

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
MARIE-EVE GAUTHIER**

**IDENTIFICATION DES PONCEAUX VULNÉRABLES AUX ÉPISODES DE
FORTES CRUES EN ZONE DE FAIBLES TOPOGRAPHIES DU SUD DU
QUÉBEC**

NOVEMBRE 2008

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Il n'y a qu'une façon d'échouer, c'est d'abandonner avant d'avoir réussi!

Olivier Lockert, Hypnose

Il est parfois difficile de travailler jour après jour sur le même projet. À plusieurs reprises, il m'a fallu prendre un peu de recul afin de résoudre des problèmes qui me semblaient insurmontables. Le soutien moral et technique des personnes de mon entourage a été pour moi d'une aide très précieuse. Je tiens particulièrement à remercier mon directeur, Denis Leroux, pour toutes les «idées de rechange» qu'il a eu, ces bons conseils et son sens de l'humour. Je remercie aussi mon co-directeur Ali Assani pour ses connaissances si précieuses. Je ne pourrais non plus oublier M. Pierre-André Bordeleau pour le temps qu'il m'a accordé lorsque mes problèmes semblaient sans solutions. De surcroît, je tiens à souligner la participation du Ministère des Transports de la Direction Territoriale (DT) de l'Ouest de la Montérégie à mon projet de recherche. M. Marcel Beaudoin et M. Lévi Sokou ont mis beaucoup de temps et de ressources à ma disposition. Il est motivant de constater que des personnes, hors du milieu universitaire, portent de l'intérêt à nos travaux.

Sans ces personnes, les membres de mon comité, mes amis, mes collègues de bureaux et ma famille, mon projet de recherche aurait été bien plus ardu. Toutefois, il n'aurait probablement pas été possible sans aide financière. Je remercie donc le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie du Canada (CRSNG) de même que le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) pour leur financement.

RÉSUMÉ

Une des étapes importantes de la conception d'ouvrage d'art comme les ponceaux est l'estimation des débits de conception. Bien que les méthodes d'estimation de ces débits soient très anciennes, les règlements stricts qui obligent une méthodologie d'application de ces calculs sont relativement récents. Plusieurs ponceaux du réseau routier québécois n'ont donc pas fait l'objet de ces calculs, ce qui augmente les risques lors d'épisode de fortes crues. Toutefois, il serait onéreux et laborieux pour le Ministère des Transports du Québec d'effectuer une étude complète de chaque ponceau afin de cibler ceux qui ne sont pas en mesure de supporter les débits de conception. Il leur est donc impossible d'identifier les ponceaux les plus vulnérables aux épisodes de fortes crues, des ponceaux qui devraient être remplacés de façon prioritaire. Le but cette recherche était de proposer une méthode permettant d'identifier les ponceaux les plus vulnérables aux fortes crues en fonction de leur capacité de drainage. Un modèle numérique d'élévation (MNE) de haute précision adapté à un terrain de faible topographie a été généré tout en tenant compte des modifications topographiques et hydrologiques apportées par le réseau routier. Les variables essentielles à l'établissement d'une relation pour l'estimation du diamètre des ponceaux ont été identifiées, mais seule la superficie a été retenue en tant que variable significative. En effet, les résultats obtenus sur la zone à l'étude suggèrent que la superficie des bassins de drainage des ponceaux explique à 67% le diamètre des ponceaux. Les ponceaux dont le diamètre était inférieur à l'intervalle de prévision ont été considérés comme vulnérables aux fortes crues.

Mots clés : SIG, Transport, Ponceau, MNE, Crues, Bassin versant

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des cartes	viii
Liste des symboles et abréviations	ix
Introduction	x
CHAPITRE I	
Revue de la littérature.....	1
1.1 Les ponceaux	1
1.1.1 Définition.....	1
1.1.2 Sélection et dimensionnement des ponceaux	1
1.1.3 Problèmes causés par des ponceaux inadéquats	3
1.2 Les débits de conception	4
1.2.1 Caractéristiques influençant le débit	4
1.2.2 Méthode de calcul de débit de récurrence	5
1.2.3 Méthode du Ministère des Transports du Québec.....	7
1.3 La délimitation des bassins versants	9
1.3.1 Description d'un modèle numérique d'élévation	9
1.3.2 Méthode d'interpolation du modèle numérique d'élévation	11
1.3.3 Matrice d'écoulement.....	15
1.3.4 Zones plates et dépressions des modèles numériques d'élévation	16
1.3.5 Utilisation du réseau hydrographique lors de la délimitation des bassins versants	18
1.3.6 Utilisation du réseau routier lors de la délimitation des bassins versants	19
CHAPITRE II	
Problématique et objectifs	21
2.1 Problématique.....	21
2.2 Objectifs	22

CHAPITRE III

Méthodologie.....	24
3.1 Méthodologie générale	24
3.2 Ponceaux à l'étude.....	24
3.2.1 Territoire à l'étude.....	24
3.3 Délimitation des bassins de drainage à l'aide des MNE	28
3.3.1 Logiciel utilisé.....	28
3.3.2 Données utilisées pour la création du MNE.....	28
3.3.3 Choix de la méthode d'interpolation.....	30
3.3.4 Modifications apportées au MNE.....	33
3.3.5 Délimitation des bassins de drainage	33
3.4 Classification supervisée de l'image Landsat	34
3.4.1 Logiciel et données utilisés	34
3.4.2 Choix de la méthode de classification.....	36
3.5 Relation entre le diamètre des ponceaux et la superficie des bassins de drainage	36

CHAPITRE IV

Résultats	37
4.1 Recensement des ponceaux	37
4.2 Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation spatiale.....	37
4.3 Délimitation des bassins de drainage des ponceaux.....	38
4.4 Classification supervisée de l'image LANDSAT	42
4.5 Vérification de l'influence de différents critères sur le diamètre des ponceaux.....	44

CHAPITRE V

Conclusion.....	46
Bibliographie	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bandes spectrales de l'image satellite du capteur ETM+ de Landsat 7 ayant une résolution de 30 mètres au sol.	35
Tableau 2: Paramètres utilisés lors de la classification des valeurs spectrales de l'image satellite.....	36
Tableau 3: Distribution du nombre de ponceaux en fonction des routes.....	37
Tableau 4 : Résultat de la racine de l'erreur moyenne au carré pour les différentes méthodes d'interpolation spatiale de la recherche	38
Tableau 5 : Matrice de confusion des sites d'entraînement de la classification supervisée de l'image LANDSAT	42
Tableau 6 : Statistiques descriptives du pourcentage d'utilisation du sol des bassins de drainage des ponceaux.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Ponceau rectangulaire permettant à un cours d'eau de traverser la route.....	1
Figure 2: Catégories et formes de ponceaux.	2
Figure 3: Ponceau double dont une partie est à moitié sédimentée	2
Figure 4: Variation des coûts en fonction de la période de récurrence r.....	3
Figure 5 : Représentation schématique d'un bassin versant	5
Figure 6 : Modèle numérique d'élévation	10
Figure 7 : Délimitation d'un bassin versants à l'aide d'un MNE.....	11
Figure 8 : Courbes de niveau (En brun) et points d'élévations (En noir)	11
Figure 9 : Méthodes d'interpolation exacte et inexacte	12
Figure 10 : Utilisation de points d'élévation pour l'interpolation de l'élévation.....	13
Figure 11 : Méthode d'interpolation du Réseau Triangulaire Irrégulier.....	14
Figure 12 : Zones planes des MNE	15
Figure 13 : Dépression localisée dans une zone de très faible topographie.....	16
Figure 14 : Représentation schématique du profil d'un MNE qui illustre la création des dépressions par une mauvaise interpolation.	17
Figure 15 : Réseau hydrographique en zone de faible topographie	18
Figure 16 : Représentation schématique de l'effet d'une route sur la topographie.....	19
Figure 17 : Dommages à la route causés par le bris d'un ponceau.	21
Figure 18 : Méthodologie générale de la recherche	25
Figure 19 : Photo de la zone à l'étude prise au cours de l'été 2007	27
Figure 20 : Un des ponceaux répertoriés lors de l'étude.....	27
Figure 21 : Méthodologie de délimitation des bassins de drainage	30
Figure 22 : Division de la zone à l'étude en 4 sections.....	31
Figure 23: Points d'élévations ayant servis à calculer le RMSE	32
Figure 24 : Fréquence du diamètre des ponceaux	37
Figure 25 : Distribution de la superficie et de la pente des bassins de drainage.....	41
Figure 26 : Carte des pentes pour la section de la rivière des Anglais.....	41
Figure 27 : Relation entre la superficie et le diamètre des ponceaux.....	44
Figure 28 : Délimitation des bassins de drainage qui ne semble pas appropriée	47

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Direction territoriale de l'Ouest de la Montérégie	26
Carte 2 : Ponceaux à l'étude	29
Carte 3 : Matrices d'accumulation des différentes méthodes d'interpolation	39
Carte 4 : Bassins de drainage des ponceaux	40
Carte 5 : Classification supervisée de l'image satellite LANDSAT	43

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

ANUDEM	Australian National University Digital Elevation Model
BDTQ	Base de Données Topographique du Québec
BNDT	Base de Nationale de Données Topographique
DEN3DC1	Réseau fédéral de DENsification 3D du Canada de niveau 1
DT	Direction Territoriale
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GPS	Système de positionnement global ou «Global Positioning System»
INRS	Institut National de la Recherche Scientifique
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
IDW	Inverse de la Distance Pondérée ou «Inverse Distance Weighting»
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NDVI	Indice de différence normalisée de la végétation ou «Normalized Difference Vegetation Index»
RAPC1	Repères Altimétriques Primaires du Canada de niveau 1
RBC1	Réseau de Base Canadien de niveau 1
RMSE	Racine de l'erreur moyenne au carré ou Root Mean Square Error
SIG	Système d'Information Géographique
TIN	Réseau Triangulaire Irrégulier ou «Triangular Irregular Network»

INTRODUCTION

La conception d'ouvrage d'art est une science qui ne cesse de se développer afin de suivre les avancées technologiques. Des événements comme l'effondrement du viaduc de la Concorde (2007), des ponceaux de l'autoroute 40 en Mauricie (2005) et de la route 339 dans Lanaudière (2007) ne sont pas sans rappeler que plusieurs personnes circulent sur des ouvrages parfois vulnérables aux éléments naturels.

Une des étapes importantes de la conception d'ouvrage d'art comme les ponceaux est l'estimation du débit de conception ou crue de projet. Bien que les débits de conception soient très anciens, les règlements stricts qui obligent une méthodologie d'application de ces calculs sont relativement récents. La méthode actuelle du Ministère des Transports du Québec (MTQ) pour déterminer le diamètre des ponceaux exige une étude approfondie du bassin drainé par ce dernier. Toutefois, plusieurs ponceaux en place sont vieux et n'ont subi aucun calcul de dimensionnement.

Il est important que le MTQ soit en mesure de déterminer quels sont les ponceaux les plus à risque lors des épisodes de fortes crues. L'objectif de ce projet est de proposer une méthode permettant d'identifier les ponceaux les plus vulnérables aux fortes crues en fonction de leur capacité de drainage. Vous trouverez dans le présent document une revue de la littérature, la problématique, les objectifs et hypothèses, la méthodologie, les principaux résultats de la recherche et la conclusion qui en résulte.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 LES PONCEAUX

1.1.1 Définition

Selon le manuel des Ouvrages d'art de Transports Québec, un ponceau est «un ouvrage d'art de petites dimensions, construit sous remblai, et dont l'ouverture est inférieure à 4,5 m » (Transports Québec 1995). Les ponceaux sont utilisés fréquemment afin de permettre l'écoulement de l'eau sous les routes (Figure 1), car ils sont moins coûteux à construire que les ponts (Johnson et Brown 2000). Afin de bien jouer leur rôle, les ponceaux doivent être en mesure d'assurer un drainage adéquat de l'eau, et ce, même en période de crue.



Figure 1 : Ponceau rectangulaire permettant à un cours d'eau de traverser la route

1.1.2 Sélection et dimensionnement des ponceaux

Le diamètre des ponceaux est déterminé en fonction d'un débit de conception. Toutefois, le ponceau doit aussi permettre un bon support des charges, une résistance à l'abrasion et à la corrosion en plus de tenir compte du profil de la route et du cours d'eau tout en minimisant les coûts de construction et d'entretien. L'intégration au milieu est

primordiale. Un ponceau ne doit pas empêcher le passage des poissons de même que la navigation sur le cours d'eau s'il y a lieu (Beckers et al. 2002; Hotte et Quirion 2003; Johnson et Brown 2000; Molloy et Torresan 2001; Potvin 1997).

Il existe deux catégories de ponceau : les ponceaux à contour fermé et ceux à contour ouvert (Figure 2). Ces derniers, moins fréquents, sont généralement utilisés lorsque le sol de fondation est très résistant ou lorsqu'il s'agit du roc. Le lit naturel du cours d'eau peut alors être préservé.

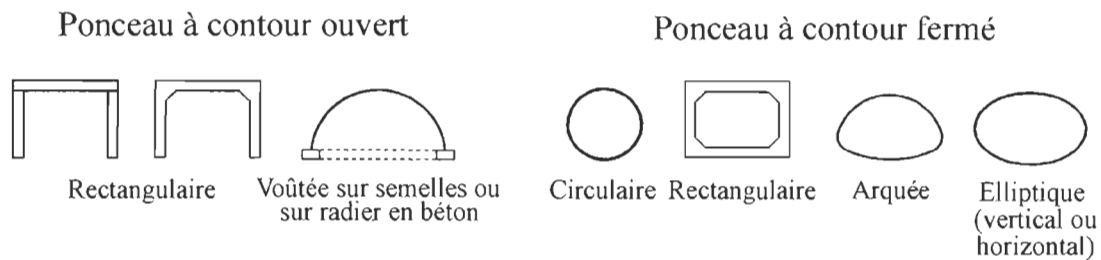


Figure 2: Catégories et formes de ponceaux

Figure tirée du Manuel de conception des ponceaux (Ministère des Transports 1994)

Plusieurs ponceaux peuvent aussi être utilisés conjointement afin d'augmenter la capacité d'écoulement (Figure 3).



Figure 3: Ponceau double dont une partie est à moitié sédimentée

Le diamètre des ponceaux est déterminé en fonction d'un débit de conception. Il s'agit d'une crue d'une période de récurrence de 50 ans pour les ponceaux d'autoroute, de 25 ans pour les routes nationales et de 10 ans pour les autres routes. Toutefois, le diamètre d'un ponceau ne devrait pas être inférieur à 900 mm pour les autoroutes et 750 mm pour

les routes nationales, régionales et collectrices (Transports Québec 1995). Bien qu'un débit de conception de 25 ans ou de 50 ans semble relativement élevé, *The forest practices code* de la Colombie-Britannique insiste sur le fait que les ponceaux de routes doivent être en mesure de supporter un débit de récurrence de 100 ans (Beckers et al. 2002). De plus, les ponceaux sont conçus en fonction d'une durée de vie utile de 75 ans pour les autoroutes et de 50 ans pour les autres classes de routes (Transports Québec 1995).

1.1.3 Problèmes causés par des ponceaux inadéquats

Un ponceau inadéquat peut rendre le chenal du cours d'eau instable, causer de la sédimentation (Figure 3) ou de l'érosion et augmenter la vitesse du courant ce qui peut empêcher le passage des poissons (Hotte et Quirion 2003 ; Potvin 1997). De plus, un ouvrage sous dimensionné apporte un risque pour la société lors des fortes crues (Tung et Bao 1990). Il est toutefois impossible d'éliminer tous les risques liés aux crues (Rousselle et al. 1990). Les débits de conception ont pour objectif de ramener le risque à un niveau acceptable, tout en évitant que les coûts soient trop élevés (Figure 4).

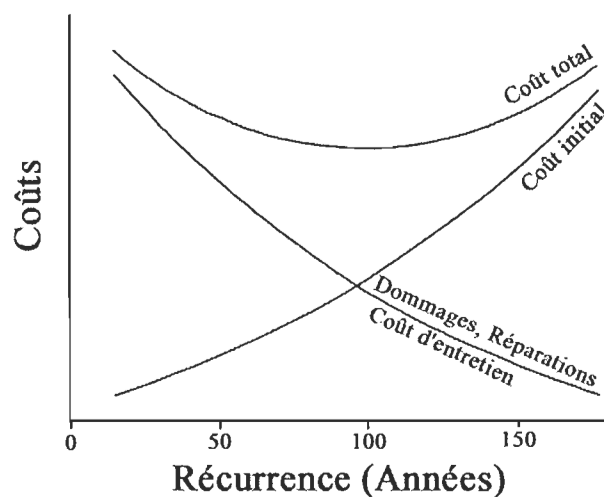


Figure 4: Variation des coûts en fonction de la période de récurrence retenue pour la conception

Figure tirée du Manuel de conception des ponceaux (Ministère des Transports 1994)

1.2 LES DÉBITS DE CONCEPTION

Le débit est un «volume de liquide qui s'écoule à travers une section, par unité de temps» (Office Québécois de la langue Française 2008). Lors de la conception d'ouvrage d'art, un débit de conception doit être identifié. Il s'agit du «débit de crue maximal qui peut passer sans dommage ou sans risque sérieux pour la stabilité des ouvrages» (Unesco et World Meteorological organization 2007). Des événements de crues exceptionnels sont toujours possibles, mais extrêmement rares. Il faut donc établir la fréquence de la crue qui servira à l'identification du débit de conception, soit les débits pour une récurrence donnée.

1.2.1 Caractéristiques influençant le débit

Le débit d'un cours d'eau provient principalement du ruissellement sur son bassin versant (Figure 5). Les caractéristiques physiques d'un bassin influencent son débit indépendamment du climat. Les plus importantes de ces caractéristiques sont la superficie du bassin versant, la pente, la longueur du cours d'eau, le pourcentage de superficie boisée et le pourcentage de superficie en eau. Toutefois, c'est la superficie du bassin versant qui est la variable déterminante en général (Assani et al. 2006; Assani et al. 2005; Belzile et al. 1997; Rousselle et al. 1990; Hoang et Tremblay 1976; Anctil et al. 1998). En effet, elle expliquerait habituellement 85 à 95% de la variance du débit selon les différentes analyses régionales effectuées à ce jour au Québec et au Canada (Assani et al. 2006; Assani et al. 2005; Belzile et al. 1997; Rousselle et al. 1990; Hoang et Tremblay 1976; Anctil et al. 1998). Cependant, une étude réalisée au Québec a noté que «les barrages modifient significativement la relation de proportionnalité entre les débits annuels minimums et les superficies de bassins versants. Cette modification se traduit par une «diminution significative de la part expliquée de la variabilité des débits par la superficie» (Assani et al. 2005). Malgré cela, la relation entre la superficie des bassins versants et le débit est importante et il est normal que cette variable soit prise en compte dans la plupart des méthodes de calcul de débit de récurrence.

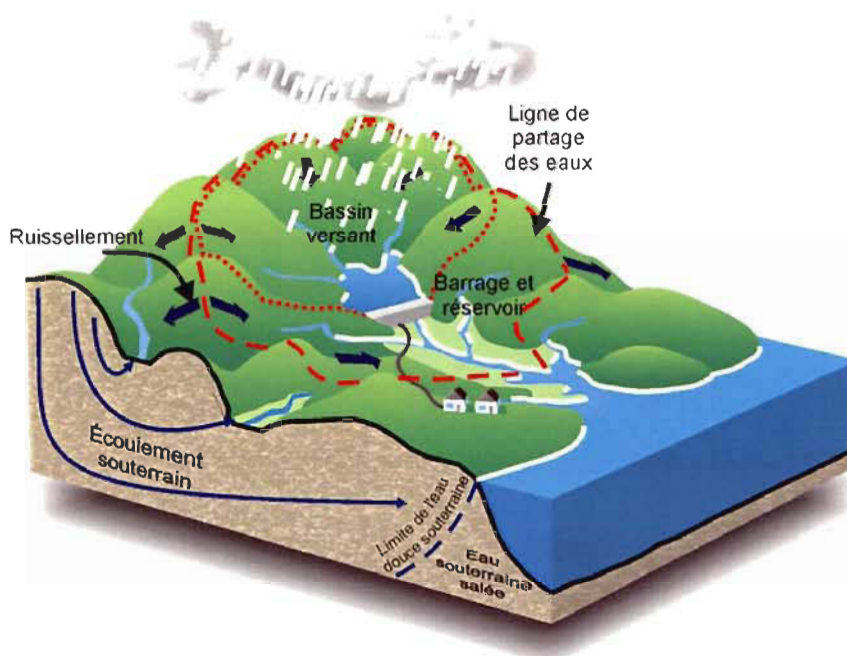


Figure 5 : Représentation schématique d'un bassin versant
Figure tirée du site Internet «Géopanorama du Canada» (Ressources Naturelles Canada 2008)

1.2.2 Méthode de calcul de débit de récurrence

Les débits de récurrence peuvent être calculés de maintes façons. La meilleure approche consiste à faire appel à plus d'un procédé, car même les méthodes les plus raffinées exigent une part de jugement afin d'établir les paramètres (Rousselle et al. 1990). Le choix des méthodes est dicté en fonction des données disponibles. Dans la plupart des cas, au Québec, aucune série hydrologique n'est disponible pour les bassins versants.

Les méthodes suivantes permettent toutes de déterminer des débits de récurrence pour des bassins non jaugés ou avec de très courtes séries hydrologiques. Cependant, aucune de ces méthodes ne tient compte des glaces ou des débris qui peuvent bloquer l'écoulement et augmenter les niveaux d'eau.

Calcul hydraulique à partir du niveau d'eau maximal

Une des méthodes de détermination des crues de référence les plus simples est le calcul hydraulique à partir du niveau d'eau maximal. Lorsqu'un niveau d'eau historique est disponible, il est envisageable de le convertir en débit. Les niveaux d'eau proviennent

souvent de traces laissées sur le terrain, de témoignage ou d'enregistrement hydrométriques. Cette méthode n'est habituellement appliquée qu'aux bassins habités depuis une longue période. Cela permet d'obtenir des enregistrements correspondant à de longues périodes de récurrence. Il faut toutefois s'assurer que le niveau d'eau n'a rien à voir avec la présence de débris ou de glace. De plus, les conditions sur le bassin de même que le climat peuvent se modifier dans le temps. Cela peut apporter des incertitudes quant à la fiabilité des résultats. Pour les estimations en eau libre, la formule de Manning est appliquée tandis que la formule d'écoulement uniforme de Lacey est utilisée s'il est difficile de bien déterminer la rugosité du cours d'eau (Rousselle et al. 1990).

Analyse de fréquence de crue régionale

L'analyse de fréquence de crues régionales permet d'estimer les crues de récurrence pour les bassins versants non jaugés. En effet, la moyenne des débits maximums annuels est établie pour évaluer la crue annuelle moyenne à l'aide de stations jaugées. On utilise par la suite les rapports régionaux des crues de «T» années de retour à la crue annuelle moyenne afin d'obtenir des estimations de débit. Les données régionales permettent d'établir une relation entre les débits et les superficies de drainage. On peut alors, avec la superficie, obtenir les débits de récurrence pour un bassin non jaugé sans nécessairement recourir à la modélisation hydrologique. L'analyse régionale apporte souvent de très bons résultats, car «elle tient compte d'une région en tant qu'un tout. Les événements cycloniques ou inhabituels prennent ainsi la place qui leur revient» (Anctil et al. 1998). Une étude de Hotchkiss et McCallum (Hotchkiss et McCallum 1995) mentionne les excellents résultats obtenus par la méthode de Fletcher, une analyse de fréquence de crue régionale.

Une analyse régionale a été réalisée pour la province de Québec par Anctil et al. (Anctil et al. 1998). Elle s'applique au cours d'eau dont l'écoulement est naturel ou quasi-naturel. L'analyse a été réalisée avec des données provenant de 136 stations, dont la superficie des bassins versants variait entre 4 et 96 600 km², avec une superficie moyenne de 7500 km². La majorité des stations avait une superficie de plus de 100 km², la médiane se situant à 2090 km². Cette méthode doit donc être utilisée avec prudence

pour les bassins de moins de 100 km², car la base de données contenait peu de bassins de cette taille.

Méthode de proportionnalité

La méthode de proportionnalité permet d'obtenir une série hydrologique pour un bassin non jaugé à partir de la série hydrologique d'un bassin versant voisin possédant des caractéristiques semblables. Un rapport en fonction de la superficie des bassins versants est effectué. Cette approche est très justifiable au Québec, car on y observe une très forte relation entre les débits et la superficie drainée (Assani et al. 2006; Assani et al. 2005; Belzile et al. 1997; Rousselle et al. 1990; Hoang et Tremblay 1976; Anctil et al. 1998). Suite à l'obtention de la série hydrologique, il ne reste qu'à calculer les débits de récurrence.

Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique permet de traduire sous forme mathématique les processus qui se produisent à l'échelle du bassin versant. La simulation des débits est un exercice complexe qui demande temps et énergie (Assani et al. 2005). Cependant, il peut être utile de recourir à la modélisation dans certaines situations. Par exemple: la crue de conception est liée à un événement spécifique, les analyses de fréquence locale et régionale ne sont pas applicables, les caractéristiques du bassin sont en voie de changer, on veut vérifier les effets d'un ouvrage sur les débits ou encore que des crues antérieures demandent une reconstitution (Rousselle et al. 1990).

Les modèles hydrologiques permettent, à l'aide de données d'entrée telles que le climat et les caractéristiques du bassin, la simulation de séries hydrologiques de même que d'événements précis. Les résultats dépendent évidemment du modèle utilisé.

1.2.3 Méthode du Ministère des Transports du Québec

La méthode utilisée par le Ministère des Transports du Québec pour définir la crue de conception d'un ponton est identique en tout point à la méthode proposée par le *Règlement sur les normes d'intervention dans les Forêts du domaine de l'État* de la *Loi sur les forêts* disponible dans la Gazette officielle du Québec (Gazette officielle du

Québec 1996). Cette méthode est assez simple et a été validée pour les bassins de drainage de moins de 25 km². Lorsque la superficie du bassin se situe entre 25 et 60 km², les résultats doivent être validés sur le terrain ou en établissant une relation avec des bassins versants jaugés sur le territoire. Il s'agit d'une adaptation de la méthode rationnelle (Ministère des Transports 1994), une méthode empirique définie comme suit :

$$Q = \frac{C_p \cdot I \cdot A_b}{360}$$

où Q = Débit de pointe (m³/s)
 C_p = Coefficient de ruissellement
 I = Intensité de la précipitation (mm/h)
 A_b = Superficie du bassin versant (hectare)

La première étape consiste à délimiter le bassin de drainage. Par la suite, le coefficient de ruissellement est calculé. Il représente le rapport du débit de pointe sur l'alimentation en pluie et se situe entre 0 et 1. Ce coefficient dépend du type de sol, de l'utilisation du sol et de la topographie. Les types de sol recouvrant le territoire sont identifiés et classifiés selon leur texture afin d'évaluer leur réponse hydrologique potentielle. Les superficies relatives à ces sols sont alors déterminées selon l'utilisation du territoire et la pente moyenne du bassin versant. Cette dernière varie entre : inférieure à 3%, comprise entre 3 et 8% et supérieure à 8%.

L'intensité des précipitations dépend de la localisation du bassin versant, de la durée et de la fréquence des orages qui s'y produisent. Cette valeur doit être équivalente au temps de concentration du bassin versant à l'étude. Le Ministère des Transports du Québec recommande l'utilisation des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Lorsqu'elles ne sont pas disponibles, il faut se fier aux isohyètes de la moyenne et de l'écart-type de la précipitation totale d'une durée d'une heure pour l'ensemble du Québec.

Le temps de concentration est «le temps que prendra l'eau de ruissellement pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné de l'exutoire et celui-ci» (Ministère

des Transports 1994). Il varie en fonction de la pente, du type de sol, de la végétation, de la précipitation et de la distance à parcourir.

Bien que le coefficient de ruissellement tienne compte de plusieurs caractéristiques du bassin versant afin de bien représenter la réponse hydrologique de ce dernier, il suppose que le ruissellement se produit de façon uniforme sur le territoire. Toutefois, la présence de lacs et de marécages influence grandement la réponse hydrologique en introduisant un laminage. On introduit donc un coefficient de réduction du débit, s'appliquant selon la position des lacs et marécages dans le bassin versant.

Une fois toutes ces étapes effectuées, on obtient le débit de conception de l'ouvrage, une donnée nécessaire pour déterminer le diamètre du ponceau.

1.3 LA DÉLIMITATION DES BASSINS VERSANTS

L'écoulement de surface est une donnée importante, car il permet de connaître le chemin que prend l'eau, de même que les sédiments et les contaminants qu'il transporte (Tarboton 1997). L'obtention du réseau de drainage d'un territoire permet de tracer les bassins versants des différents cours d'eau. Étant donné que la superficie des bassins versants est la variable la plus significative lors de l'explication des débits (Assani et al. 2006; Assani et al. 2005; Belzile et al. 1997; Rousselle et al. 1990; Hoang et Tremblay 1976; Anctil et al. 1998), la délimitation des bassins versants (ou bassins de drainage) est une étape primordiale pour l'identification des débits de conception des bassins ne possédant pas de série hydrologique.

1.3.1 Description d'un modèle numérique d'élévation

Le réseau de drainage de même que les bassins versants peuvent être tracés à la main. Cependant, il s'agit d'opérations longues et fastidieuses qui génèrent plusieurs erreurs (Martz et Garbrecht 1998). Afin d'automatiser le processus et de le rendre facilement reproductible, on peut utiliser un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Il s'agit d'une représentation numérique de la topographie, habituellement sous forme matricielle, dont chacun des pixels contient une valeur d'élévation (Chaplot et al. 2006). La figure 6 est un exemple de MNE d'une partie de la zone à l'étude. Les pixels en rouge représentent

les élévations les plus élevées tandis que les pixels en bleu représentent les élévations les plus basses.

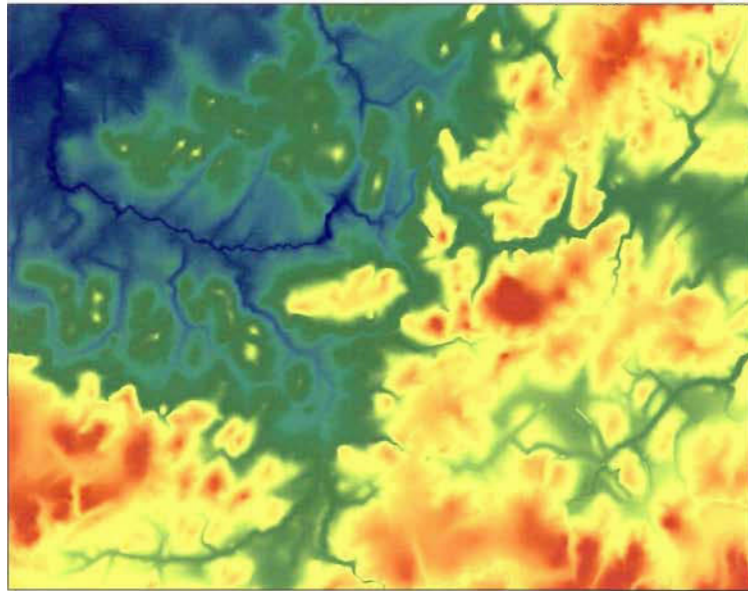


Figure 6 : Modèle numérique d'élévation

Dans cet exemple, l'élévation est présentée sous forme de couleur. Elle peut aussi être présentée sous forme numérique (Figure 7a). Il est possible d'appliquer un algorithme au MNE afin de créer une matrice d'écoulement (Figure 7b). La matrice d'écoulement permet de visualiser la direction que prend l'écoulement au niveau de chacun des pixels. Suite à cela, le nombre de pixels voisins qui se jettent dans un pixel donné est comptabilisé et lorsqu'il y a plus de pixels qu'un certain seuil, le pixel est considéré comme faisant partie du réseau de drainage. Il s'agit de la matrice d'accumulation (Figure 7c). On peut facilement identifier tout le territoire qui est drainé par un point (Figure 7d). Cela permet de délimiter les bassins versants. Il est toutefois important d'avoir un modèle numérique d'élévation précis, avec le moins d'erreurs d'interpolation possible (Kenny et Matthews 2005).

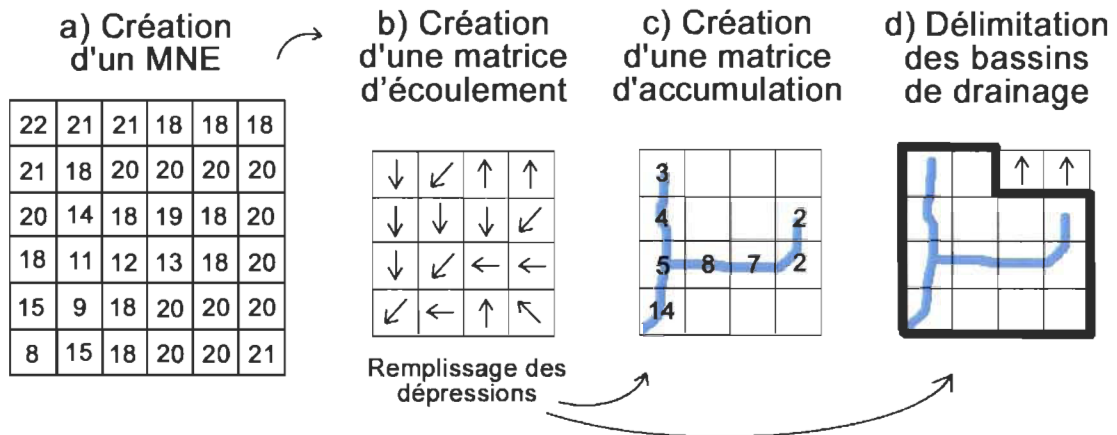


Figure 7 : Délimitation d'un bassin versants à l'aide d'un MNE

1.3.2 Méthode d'interpolation du modèle numérique d'élévation

Les méthodes d'interpolation spatiale permettent d'obtenir des valeurs d'élévation à l'intérieur de la structure matricielle en se basant sur les données ponctuelles. Les valeurs situées entre celles qui sont échantillonnées sont alors estimées de diverses manières. C'est ce qui nous a permis d'obtenir le modèle numérique d'élévation de la figure 6 à l'aide des points d'élévation et des courbes de niveau de la figure 8.

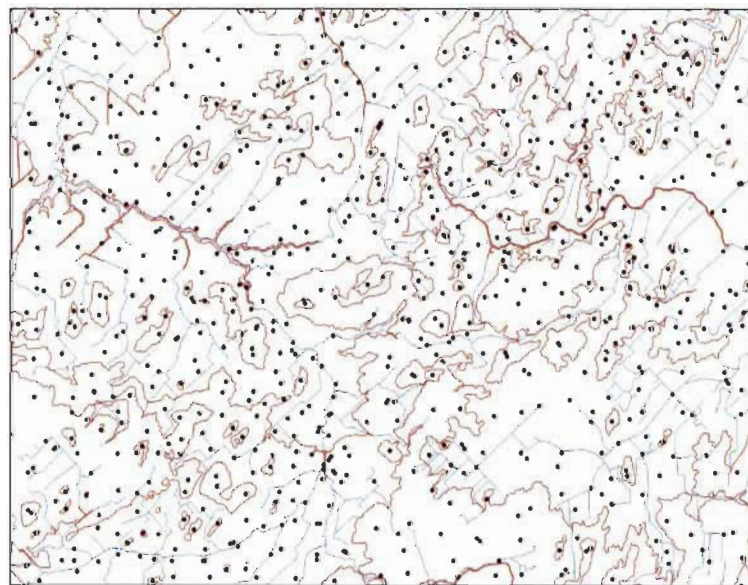


Figure 8 : Courbes de niveau (en brun) et points d'élévations (en noir) qui ont servi à la création du MNE de la figure 6. Le réseau hydrographique est visible en bleu

La précision d'une interpolation dépend de plusieurs éléments comme les propriétés de la surface, le nombre de points échantillonnés, la méthode d'échantillonnage des points, l'espacement des points et la méthode d'interpolation (Desmet 1996 ; Weng 2002). Il existe plusieurs méthodes d'interpolation: l'Inverse de la Distances Pondéré (IDW), le Krigeage, la Fonction Spline, le Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN), l'interpolation Linéaire, l'interpolation Bivariée, la Fonction de Base Radiale, la Méthode de Shepard, le Rayon de Courbure Minimal, etc. Certaines de ces méthodes sont exactes, l'interpolation passant par tous les points d'élévations, tandis que d'autres sont approximatives, l'interpolation consistant à un ajustement qui tend à passer par tous les points (Figure 9). De plus, certaines des méthodes sont dites globales, utilisant l'ensemble des points pour déterminer l'ajustement à appliquer lors de l'interpolation, tandis que d'autres sont locales et ne tiennent compte que des mesures d'élévation localisées à proximité du pixel à interpoler.

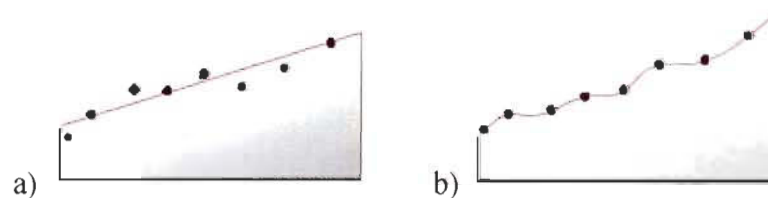


Figure 9 : Méthodes d'interpolation a) exacte et b) approximative

Figure tirée du manuel Using «ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2003)

Toutes ces méthodes ont leurs forces et leurs faiblesses. Certaines méthodes d'interpolation apportent des effets d'oeil de bœuf, comme l'inverse des distances et la méthode de Shepard (Weng, 2002). Certaines peuvent donner de bons résultats pour un type de topographie et donner une piètre performance pour un autre territoire. Par exemple, la Fonction Spline, une méthode globale approximative, donne de bons résultats dans les environnements de faible topographie (Desmet, 1996). La section suivante présente une courte description des méthodes d'interpolations utilisées lors de la recherche.

Inverse de la Distance Pondéré (IDW)

L'Inverse de la Distance Pondéré est une méthode déterministe exacte et locale. Elle consiste à utiliser les données d'élévation localisée à proximité du pixel à interpoler pour

déterminer sa valeur (Figure 10). En effet, plus un pixel est proche d'un point d'élévation, plus il risque d'avoir une élévation semblable à ce point. Toutefois, plus un point est éloigné du pixel à interpoler, plus son poids dans le modèle sera faible.

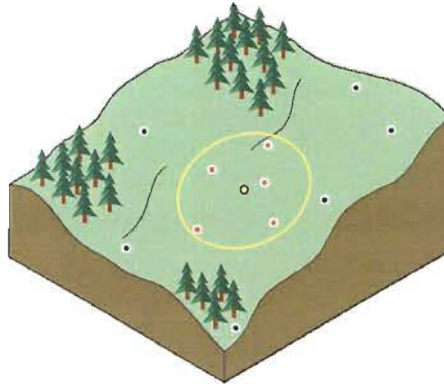


Figure 10 : Utilisation de points d'élévation pour l'interpolation de l'élévation d'un point précis (en jaune)

Figure tirée du manuel «Using ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2003)

Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation probabiliste (Chaplot et al. 2006 ; Weber et Englund 1994 ; Weng 2002). Il existe différents types de krigeage : Ordinaire, Simple, Universel, etc. Dans tous les cas, il s'agit d'une méthode statistique très flexible, exacte ou inexacte selon les résultats voulus, permettant la génération d'une cartographie de la probabilité de l'erreur. Il ne base pas seulement l'interpolation sur un poids donné à chaque point d'élévation en fonction de la distance avec le point à interpoler, il tient aussi compte de la disposition des points dans l'espace.

Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN)

Un TIN consiste en des sommets représentant les points d'élévation, reliés par des arrêtes qui forment des surfaces triangulaires représentant l'élévation du territoire (Figure 11). Cette méthode très simple et exacte permet facilement de visualiser le MNE en trois dimensions (Figure 11c).

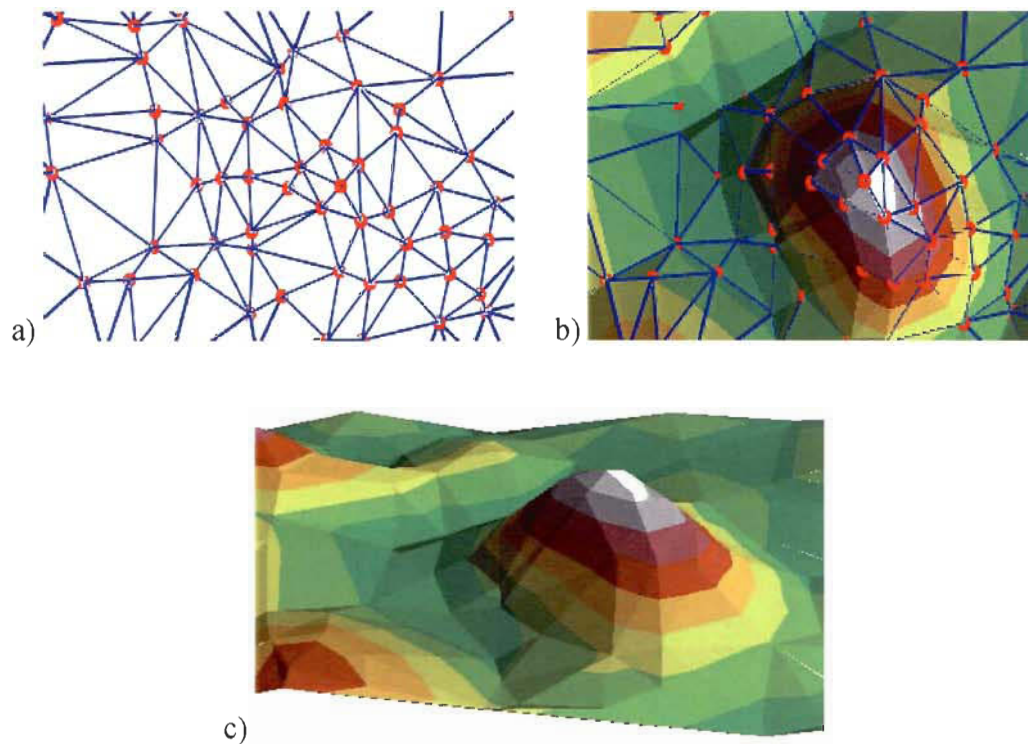


Figure 11 : Dans un TIN, les a) sommets (points d'élévations) sont reliés ensemble par des arrêtes, ce qui permet d'obtenir b) des facettes triangulaires représentant l'élévation du territoire. Le MNE ainsi obtenu peut aisément être visualisé en 3D

Figure tirée du manuel «Using ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2003)

Topo to raster

«Topo to raster» est une méthode d'interpolation basée sur le module ANUDEM (Australian National University Digital Elevation Model). Ce module a été développé par Michael Hutchinson (Hutchinson et Dowling 1991). La procédure d'interpolation est optimisée pour obtenir une vitesse d'exécution semblable aux méthodes locales tout en tenant compte des données de façon globale. De plus, comparativement aux autres méthodes, elle permet d'utiliser facilement et efficacement les courbes de niveau. Elle impose aussi des conditions de drainage provenant d'un réseau hydrologique orienté en plus d'éliminer les dépressions. Cette méthode permet de générer un MNE hydrologiquement réaliste.

Les méthodes d'interpolation permettent généralement d'obtenir un modèle numérique d'élévation en format matriciel. Lorsque ce n'est pas le cas (ex : TIN), il est toujours

possible de transférer le MNE en matrice. Par la suite, afin d'être en mesure de délimiter les bassins versants, une matrice d'écoulement est créée à partir du MNE.

1.3.3 Matrice d'écoulement

Plusieurs algorithmes ont été développés afin d'obtenir une matrice d'écoulement. Citons en exemple l'algorithme D8, le «Multiple flow direction methods based on slope» (MS), l'algorithme de Lea, DEMON et D^∞ . Ces algorithmes diffèrent par les directions d'écoulement possibles, la présence ou l'absence de dispersion, la structure d'enregistrement des données et la méthode qui détermine la direction de l'écoulement (Tarboton 1997). Les écoulements parallèles (Figure 12) de même que la trop forte dispersion induite par certains algorithmes ne sont pas représentatifs de la réalité.

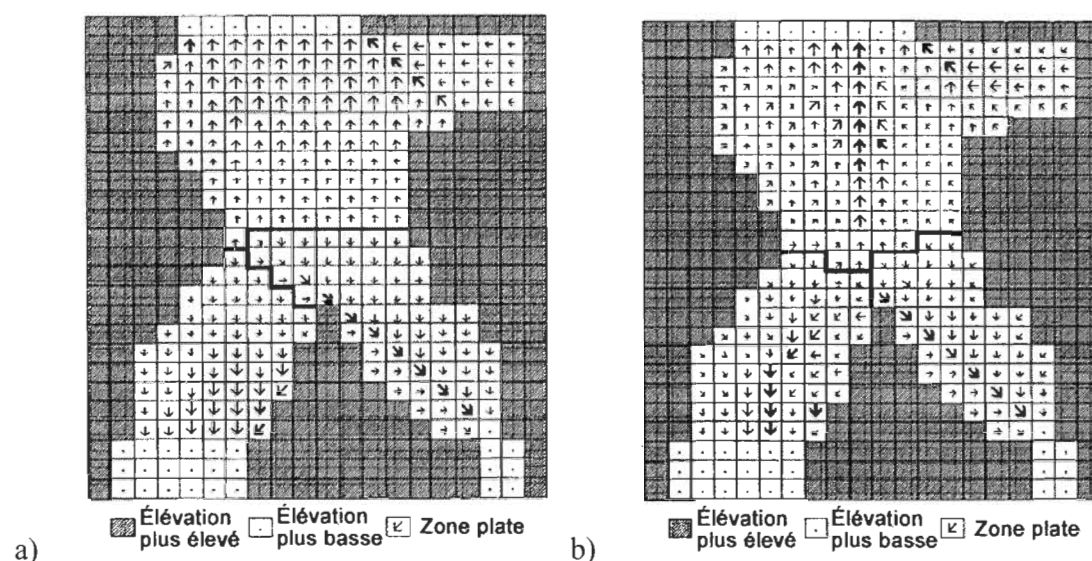


Figure 12 : Les zones planes des MNE sont sujettes aux a) écoulements parallèles. La b) réalité terrain apporte plutôt une concentration de l'écoulement

Figure tirée de «Hydrological Processes» (Martz et Garbrecht 1998)

La méthode la plus utilisée est la méthode «deterministic eight neighbour flow direction algorithm», appelée communément D8. Elle a été introduite par O'Callaghan et Mark en 1984 (Tarboton 1997). Il s'agit de diriger l'écoulement vers le pixel à l'élévation la plus basse et la pente la plus élevée parmi les 8 pixels voisins (Figure 7). Toutefois, l'algorithme D^∞ est de plus en plus utilisé (Tarboton 1997). Ce dernier permet toutes les directions d'écoulement possible, contrairement à l'algorithme D8 qui n'en permet que

8. Cet algorithme a été comparé et utilisé dans plusieurs recherches (Chirico et al. 2005 ; Endreny et Wood 2000 ; Tarboton 1997 ; Zhang et al. 2005) dont, entre autres, une étude comparative sur des zones agricoles ondulées du Nord-est du Colorado (Erskine et al. 2006). Cette étude affirme que les méthodes qui permettent la divergence d'écoulement (MS, DEMON et D_{∞}) sont plus appropriées pour ce type de terrain que celles qui ne le permettent pas (D8) lorsque le MNE est à forte résolution. Toutefois, ces algorithmes sont plus lourds à gérer que l'algorithme D8.

Malgré la diversité des algorithmes, leur application sur un MNE n'est pas toujours facile. Ce dernier contient parfois des zones où il est difficile d'établir le sens de l'écoulement en raison de la faible topographie de certains environnements.

1.3.4 Zones plates et dépressions des modèles numériques d'élévation

Un des problèmes majeurs lors de la création de matrice d'écoulement est la formation de zones plates ou de dépressions par le MNE (Martz et Garbrecht 1998). Dans la littérature, nous retrouvons deux écoles de pensée sur les causes des dépressions et des zones plates. La première considère que les zones plates et les dépressions des MNE sont de vrais éléments du paysage. Bien que cela soit vrai pour les terrains plats (Figure 13) et les MNE de haute précision, il n'en ait pas toujours ainsi.



Figure 13 : Dépression localisée dans une zone de très faible topographie de la zone à l'étude

La deuxième ligne de pensée croit plutôt que ces zones sont le plus souvent des erreurs d'interpolations (Figure 14), ou sont dues à la mauvaise résolution du MNE.

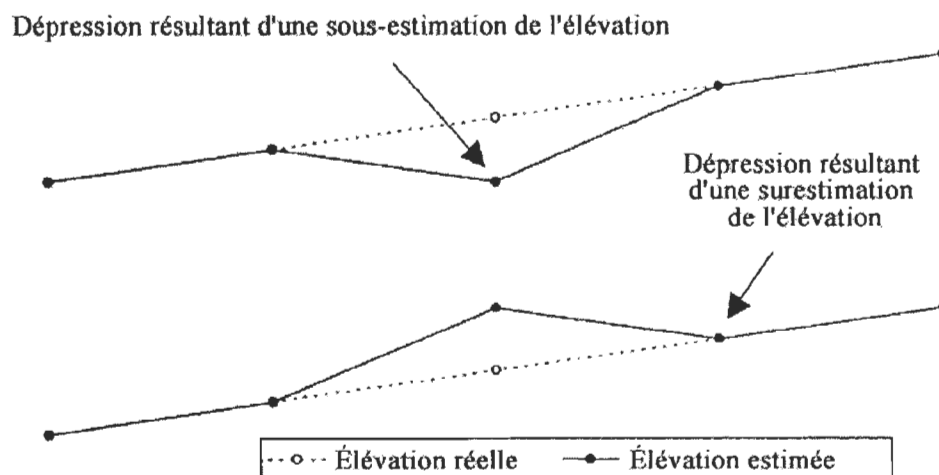


Figure 14 : Représentation schématique du profil d'un MNE qui illustre la création des dépressions par une mauvaise interpolation

Figure tirée de «Hydrological Processes» (Martz et Garbrecht 1998)

Les algorithmes qui considèrent les dépressions et zones plates comme réelles sont souvent des méthodes de remplissage et inondation. Ceux qui croient au contraire qu'il s'agit d'erreurs ont recours à deux types de méthode pour les corriger. La première, la méthode par filtre, ajuste et enlève toutes les erreurs du MNE. Elle réduit toutefois la précision de celui-ci en enlevant des zones problématiques ainsi que des zones non problématiques. La deuxième méthode traite séparément de chaque cas à problème. Les dépressions peuvent alors être considérées comme venant de la sous-estimation ou de la surestimation d'un point lors de la création du MNE. Dans le premier cas, il suffit de remplir la dépression (méthode par remplissage) tandis que dans le second cas, il faut abaisser l'exutoire (méthode par brèche).

Lorsque toutes les zones plates et dépressions sont traitées, on obtient une matrice d'écoulement et un réseau de drainage qui permet la délimitation des bassins versants. Toutefois, certaines données peuvent être ajoutées pour obtenir une meilleure précision, notamment le réseau hydrographique et le réseau routier.

1.3.5 Utilisation du réseau hydrographique lors de la délimitation des bassins versants

Lors de la création de matrices d'écoulement, il faut faire attention à ne pas confondre les zones plates avec les lacs. Les MNE ne comportent pas, à la base, d'informations sur le positionnement de ceux-ci. L'utilisation de données auxiliaires sur les lacs permet de contrer ce problème (Turcotte et al. 2000 ; Kenny et Matthews 2005). Aussi, l'utilisation du réseau hydrographique lors du processus de création de la matrice d'écoulement par «drainage enforcement» ou par «stream burning» permet aussi d'obtenir des résultats plus proches de la réalité (Figure 15), surtout en terrain de faible topographie (Kenny et Matthews 2005).

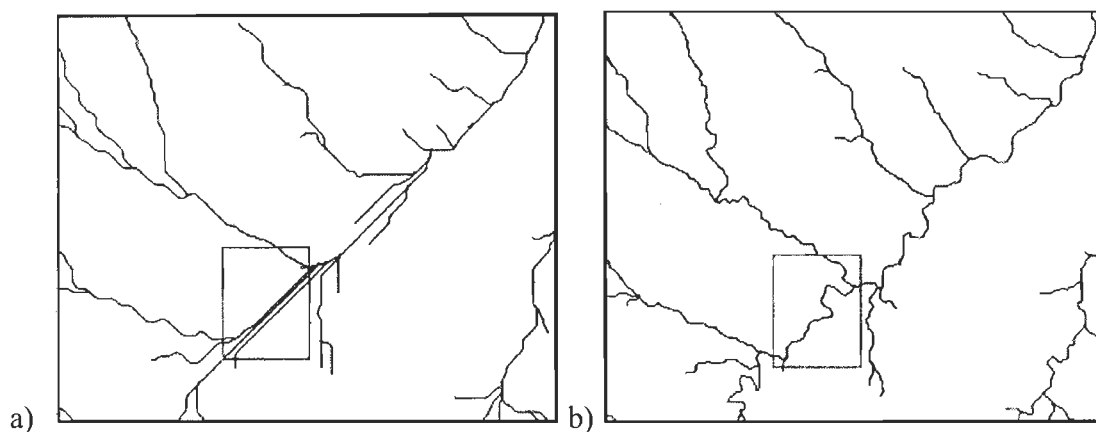


Figure 15 : Le réseau hydrographique tiré a) de la matrice d'accumulation est très différent de celui tiré de b) la photo-interprétation en zone de faible topographie

Figure tirée de «Journal of Hydrology» (Turcotte et al. 2000)

Le «drainage enforcement» décroît l'élévation en suivant le réseau hydrographique vectoriel. Toutefois, il ne s'assure pas qu'il s'agit du gradient de pente le plus fort, ce qui implique qu'il n'y ait pas nécessairement concordance entre le réseau vectoriel et celui qui est modélisé. La méthode ANUDEM, utilisée en Ontario par Ontario Ministry of Natural Resources, fait partie de ce type de méthode. Le «stream burning» est un autre type de méthode. Il diminue l'élévation du MNE en fonction de la distance qui le sépare du réseau hydrologique vectoriel. Bien que cette méthode donne de bons résultats, elle génère des problèmes dans les jonctions complexes où il y a plusieurs chenaux proches,

de même que dans les milieux humides ou les zones plates. La méthode proposée par Turcotte et al. (Turcotte et al. 2000) fait partie de ce type de méthode.

Cependant, bien que le réseau hydrographique soit la donnée la plus utilisée pour augmenter la précision de la matrice d'écoulement, d'autres types de données peuvent être fort utiles, surtout en terrain de faible topographie.

1.3.6 Utilisation du réseau routier lors de la délimitation des bassins versants

Parmi les données susceptibles d'améliorer la précision des matrices d'écoulement, nous retrouvons le réseau routier. En effet, la présence de routes en zone de faible topographie influence le drainage par les modifications topographiques qu'elle apporte au territoire (Duke et al. 2003 ; Duke 2004 ; Duke et al. 2005). Dans certains cas, les routes deviennent une barrière à l'écoulement tandis que les fossés concentrent celui-ci (Figure 16).

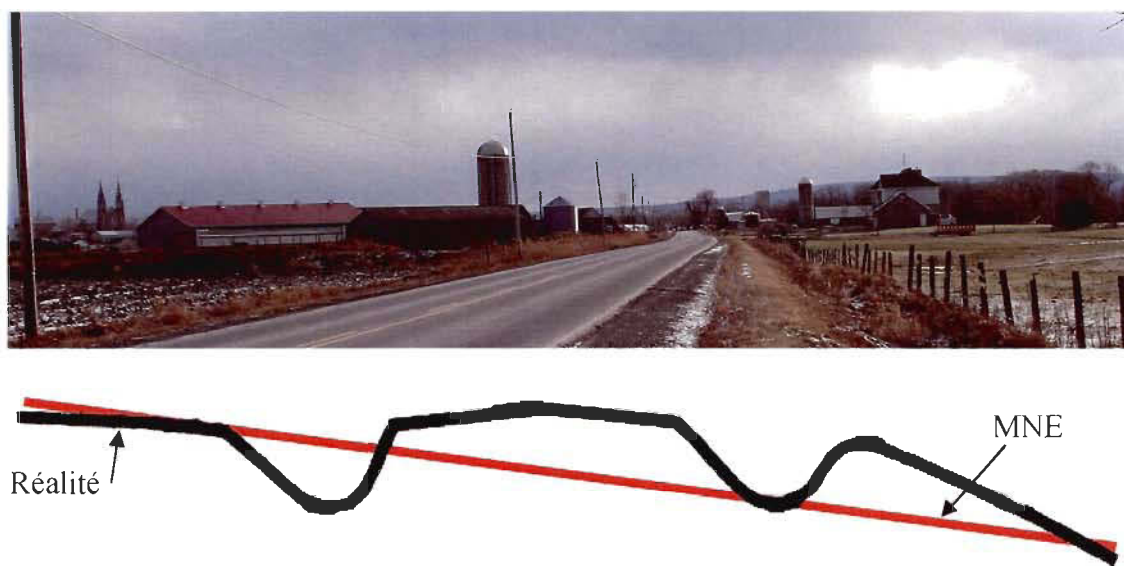


Figure 16 : Représentation schématique de l'effet d'une route sur la topographie. Un MNE qui ne possède pas d'information sur le réseau routier ne tiendra pas compte de l'effet de barrière créé par celui-ci

L'utilisation du réseau routier est une nouvelle voie d'avenir dans la création des matrices d'écoulement. L'équipe du département de géographie de l'Université de Lethbridge, en Alberta, a entre autres utilisé les données d'élévations mesurées lors de coupe transversale de routes afin de modifier les MNE. La délimitation des bassins

versants différait beaucoup de celle obtenue sans modification et l'écoulement semblait beaucoup plus réaliste, car il tenait compte de l'effet de digue apporté par les routes (Duke et al. 2003 ; Duke 2004 ; Duke et al. 2005).

CHAPITRE II

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 PROBLÉMATIQUE

Lors d'épisodes de fortes crues, il arrive fréquemment que les ponceaux des routes ne suffisent pas à la tâche, occasionnant des dommages à la route (Figure 17) tout en empêchant la circulation routière (Beckers et al. 2002 ; Tung et Bao 1990). En plus d'augmenter les risques pour les usagers du réseau de transport et pour les infrastructures routières, un ponceau sous dimensionné peut créer de l'instabilité au niveau du chenal, nuisant ainsi aux écosystèmes aquatiques (Beckers et al. 2002; Hotte et Quirion 2003; Johnson et Brown 2000; Molloy et Torresan 2001; Potvin 1997).



Figure 17 : Dommages à la route causés par le bris d'un ponceau. Ces événements sont survenus lors des fortes crues de l'été 2007 dans la province de Terre-Neuve

Figure tirée du site Internet du National Post (Boutet et National Post 2007)

Bien que le diamètre des ponceaux ne soit plus déterminé de façon instinctive, des inondations surviennent régulièrement, autant sur les nouveaux ouvrages que sur les anciens. Il est difficile pour le MTQ de cibler les ponceaux à remplacer de façon prioritaire avec la méthode actuelle car cette dernière nécessite beaucoup de données en plus du nombre considérable de ponceaux à évaluer. De plus, un ponceau qui était bien dimensionné par le passé peut ne plus l'être aujourd'hui.

Plusieurs facteurs peuvent modifier la capacité des ponceaux à résister aux événements de fortes crues, soit en réduisant la capacité de drainage des ponceaux, soit en augmentant l'intensité des crues. La sédimentation des ponceaux de même que le bris de ceux-ci sont des exemples de facteurs qui diminuent la quantité d'eau qui peut s'écouler par le ponceau, donc sa capacité de drainage. L'augmentation de l'intensité des crues peut être générée par plusieurs phénomènes dont les modifications effectuées sur le bassin versant après la mise en place des ponceaux. Les changements d'affectation du sol (développement de l'agriculture, déboisement, urbanisation, etc.) de même que la rectification des cours d'eau et la pose de drains et de fossés de drainage en zones agricoles peuvent modifier plus ou moins significativement les conditions de ruissellement de surface, augmentant ainsi l'intensité et la fréquence des inondations (Jakob et Jordan 2001 ; Rousselle et al. 1990).

La modification des bassins n'est pas le seul élément qui influence les débits de pointe. En effet, il est de plus en plus admis que les changements climatiques provoqués par les gaz à effet de serre d'origine anthropique se traduiront par une hausse de l'intensité des crues (Charlton et al. 2006 ; Intergovernmental Panel on Climate Change 2001; Roy et al. 2001). Cette hausse pourrait entraîner une disproportion entre la magnitude des crues et le diamètre des ponceaux actuels.

Pour finir, le problème principal est qu'il serait coûteux et fastidieux pour le MTQ d'effectuer une étude complète de chaque ponceau afin de cibler ceux qui ne sont pas en mesure de supporter les débits de conception. Il leur est donc impossible d'identifier les ponceaux les plus vulnérables aux épisodes de fortes crues, des ponceaux qui devraient être remplacés de façon prioritaire.

2.2 OBJECTIFS

En réponse aux problèmes soulevés précédemment, l'objectif principal de cette étude est de proposer une méthode permettant d'identifier les ponceaux les plus vulnérables aux fortes crues en fonction de leur capacité de drainage. Pour ce faire, il sera essentiel de développer une méthode ayant recours à un nombre restreint de données pour faciliter la

tâche du Ministère lors de l'identification du diamètre approprié des ponceaux. La recherche se concentrera sur la problématique des débits de conception¹.

La recherche se base sur l'hypothèse principale suivante :

- ≈ Un ponceau est vulnérable si son diamètre est plus petit que la taille déterminée par la superficie de son bassin de drainage.

En lien avec l'objectif principal de cette étude et cette hypothèse nous allons :

- ~ Générer un MNE de haute précision adapté à un terrain de faible topographie.
- ~ Proposer une méthode rapide et simple de délimitation des bassins de drainage des ponceaux qui tient compte des modifications topographiques et hydrologiques apportées par le réseau routier.
- ~ Identifier les variables essentielles à l'établissement d'une relation entre la superficie des bassins de drainage des ponceaux et le diamètre de ces derniers.
- ~ Établir une relation entre la superficie des bassins de drainage des ponceaux et le diamètre de ceux-ci.

¹ La réduction de la capacité de drainage des ponceaux ainsi que les effets des changements climatiques ne seront donc pas étudiés.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !
(Albert Einstein)

3.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La méthodologie générale de la recherche est synthétisée à la figure 18. La première étape a été la collecte des données, soit les ponceaux à l'étude. Les bassins de drainage des ponceaux ont été délimités et leur superficie de même que leur pente ont été calculées. Afin d'obtenir d'autres caractéristiques sur ces bassins, une image satellite a été classifiée. L'utilisation du sol qui en est ressortie, de même que la superficie et la pente, font parti des variables analysées par régression afin de vérifier leur influence sur le diamètre des ponceaux. Une relation entre la superficie des bassins de drainage et le diamètre des ponceaux a ainsi été trouvée et les ponceaux les plus vulnérables aux événements de fortes crues ont été identifiés. Les sections qui suivent expliquent de manière plus détaillée chaque étape de la recherche.

3.2 PONCEAUX À L'ÉTUDE

3.2.1 Territoire à l'étude

Le projet de recherche proposé a été appliqué au territoire de la DT Ouest de la Montérégie, majoritairement dans le bassin versant de la rivière Châteauguay (Carte 1). Tous les bassins de drainage des ponceaux sont situés en zone rurale, dans la région physiographique des basses terres du Saint-Laurent. Il s'agit d'une zone de très faible topographie (Figure 19).

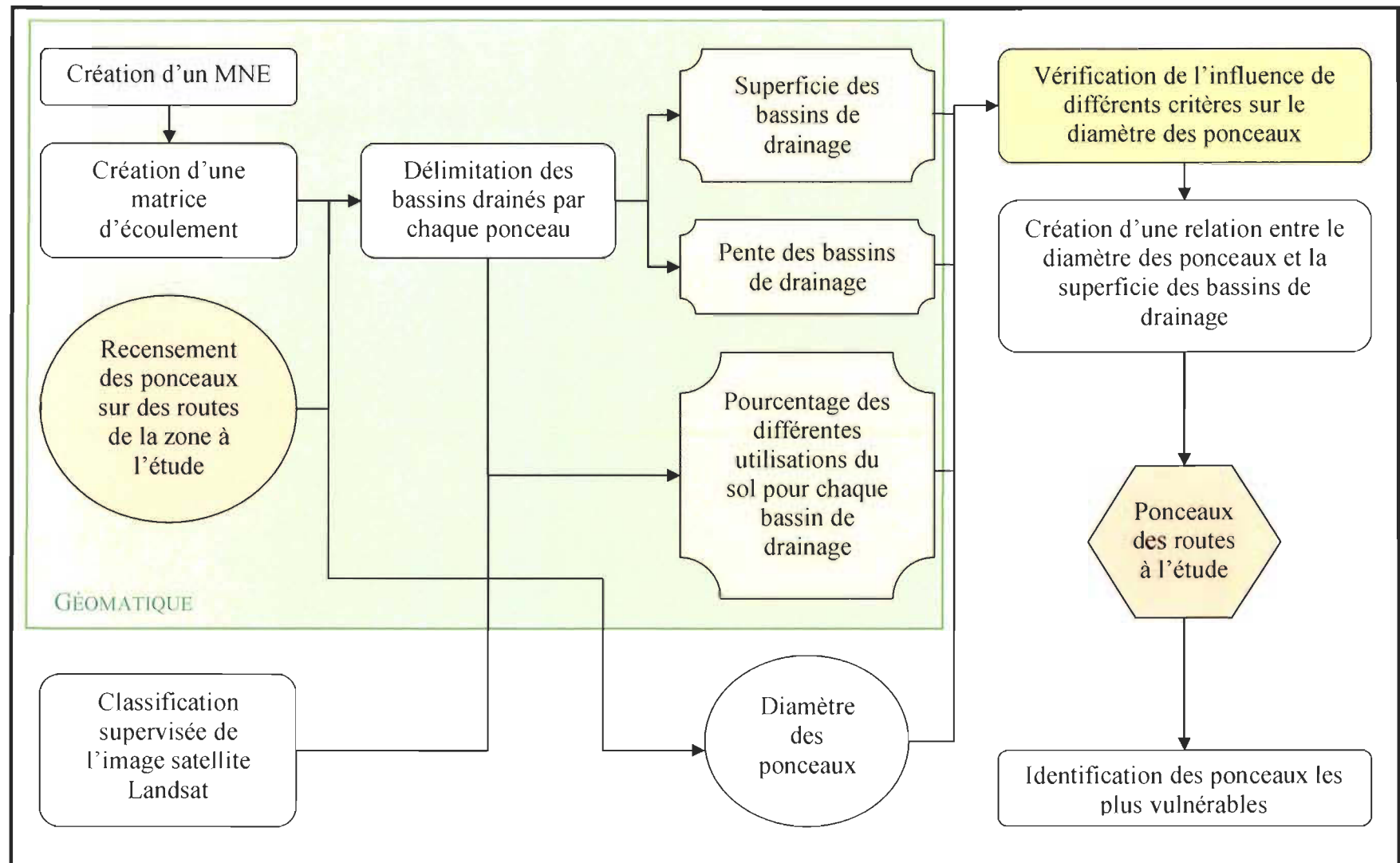


Figure 18 : Méthodologie générale de la recherche

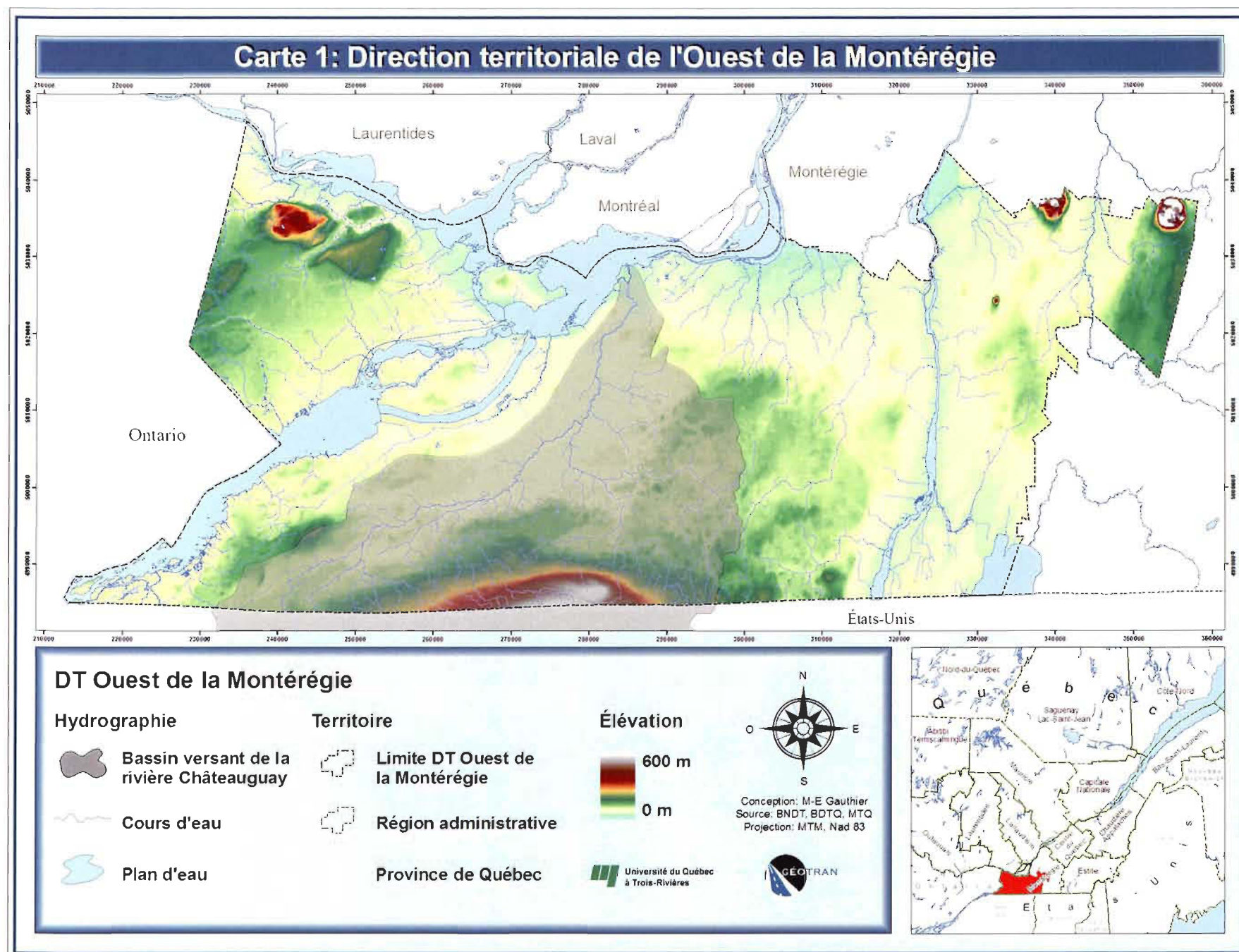




Figure 19 : Photo de la zone à l'étude prise au cours de l'été 2007

Étant donné que la période de récurrence de la crue de conception varie en fonction du type de route (Section 1.1.2) l'étude s'est concentrée sur les routes régionales et collectrices, deux types de route ayant une crue de conception d'un temps de retour de 10 ans. L'échantillon comporte 103 ponceaux circulaires localisés sur des routes spécifiques de la DT (Carte 2). Tous les ponceaux circulaires localisés sur ces routes ont été répertoriés lors du printemps et de l'été 2007 (Figure 20).



Figure 20 : Un des ponceaux répertoriés lors de l'étude

Ces routes sont localisées principalement dans deux sous-bassins de la rivière Châteauguay, soit le bassin de la rivière de l'Esturgeon et le bassin de la rivière Des Fèves, en plus de toucher une petite partie du bassin versant de la rivière des Anglais, un autre sous-bassin de la rivière Châteauguay. Les données recueillies pour chacun des ponceaux se limitaient à la localisation géographique, le diamètre et une photo. Un point GPS a été pris sur le site de chaque ponceau rencontré à l'aide d'un GPS de type Garmin 76. Pour des motifs de sécurité, il nous était impossible de prendre la localisation des ponceaux de manière plus précise. De plus, une partie du recensement a été effectué par le MTQ.

3.3 DÉLIMITATION DES BASSINS DE DRAINAGE À L'AIDE DES MNE

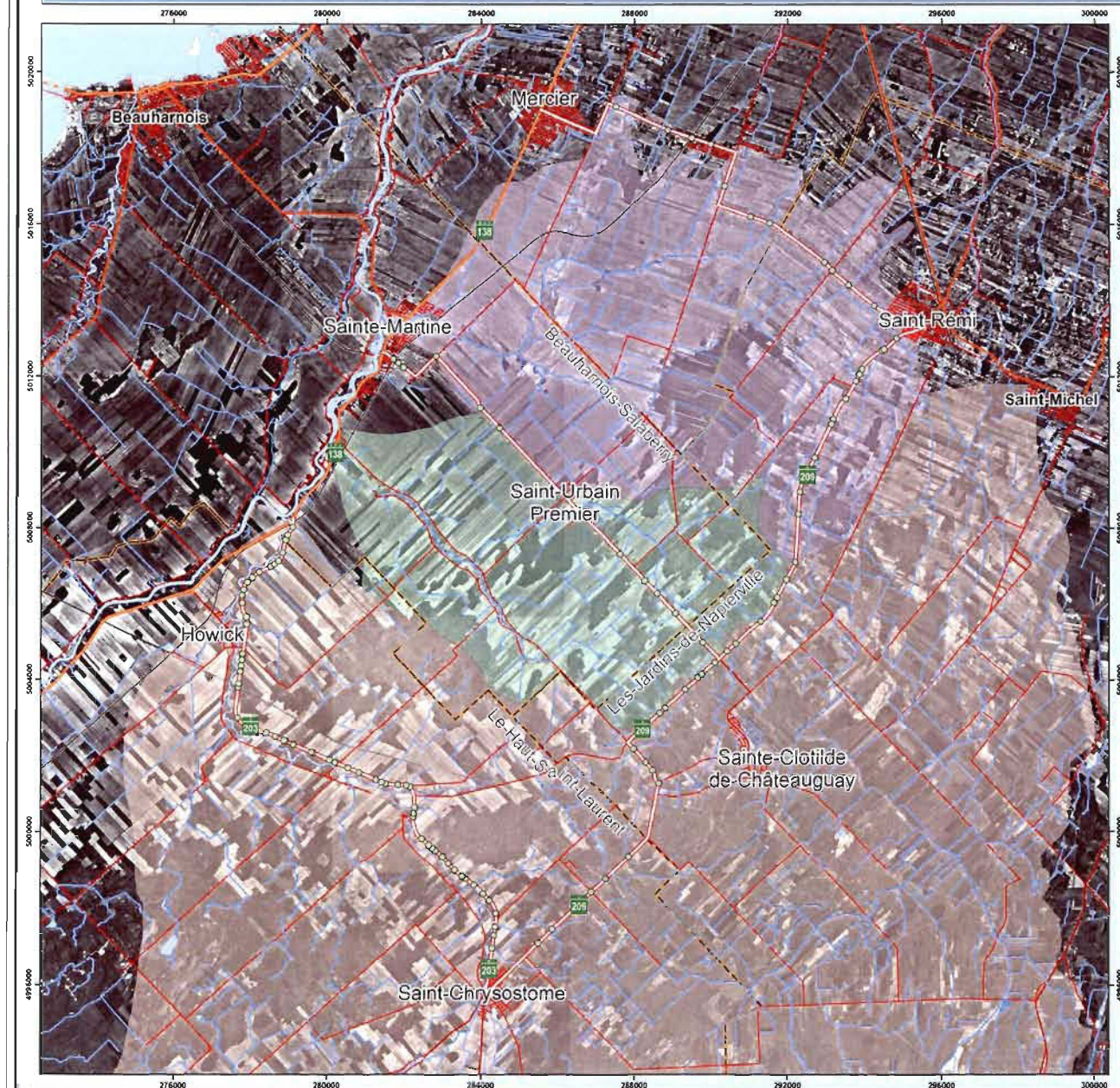
3.3.1 Logiciel utilisé

Les avantages des SIG pour collecter, entreposer, manipuler et représenter des données sont indéniables (Erdogan et al. 2007). Ceux-ci sont couramment utilisés en environnement et en hydrologie depuis plusieurs années (Chang et al. 2006). L'utilisation des SIG dans cette recherche a permis d'obtenir les différentes variables pouvant influencer le diamètre des ponceaux, dont la superficie des bassins de drainage. Le SIG qui a permis la délimitation des bassins de drainage est ArcGIS, un logiciel de la compagnie Environmental Systems Research Institute (ESRI). Le module Geostatistical analyst a, entre autres, permis de réaliser les interpolations spatiales. La figure 21 présente la méthodologie utilisée pour la délimitation des bassins.

3.3.2 Données utilisées pour la création du MNE

Les MNE ont été réalisés à l'aide des courbes de niveau au 1:20 000 de la Base de données topographique du Québec (BDTQ). Les points cotés d'élévation de cette base de données, de la Base Nationale de Données Topographiques (BNDT), des bornes géodésiques du Réseau de Base Canadien de niveau 1 (RBC1), des Repères Altimétriques Primaires du Canada de niveau 1 (RAPC1) ainsi que du Réseau fédéral de Densification 3D du Canada de niveau 1 (DEN3DC1) ont permis d'augmenter la

Carte 2: Ponceaux à l'étude



Secteur à l'étude

Réseau de transport

- Ponceau à l'étude
- Route à l'étude
- Route nationale
- Route régionale
- Route collectrice
- Route locale
- Chemin de fer

Hydrographie

- Petit cours d'eau
- Cours d'eau
- Plan d'eau

Territoire

- Limite administrative
- MRC

Bassins versants

- Des Anglais
- De l'Esturgeon
- Des Fèves

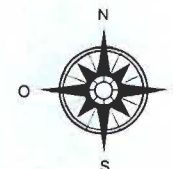


Université du Québec
à Trois-Rivières

Projection:
MTM, Nad 83, zone 8

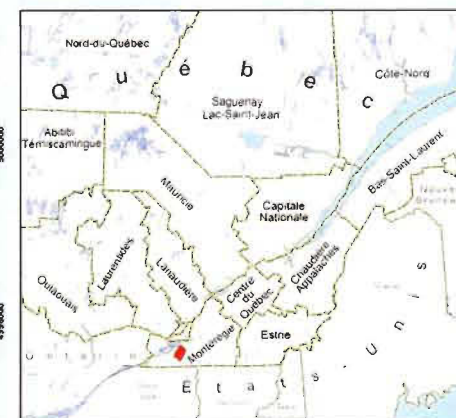
Source:
BNDT, BDTQ, MTQ

Conception:
M-E Gauthier



Kilomètres

0 0.5 1 2 3 4 5



précision du MNE. Les données de la BDTQ ont été fournies par le MTQ de la DT de l'Ouest de la Montérégie tandis que celles de la BNDT se retrouvent sur le site Internet GéoGratis (Ressources Naturelles Canada 2008). Les données des bornes géodésiques se retrouvent sur le site Internet GéoBase (Conseil canadien de la géomatique 2008).

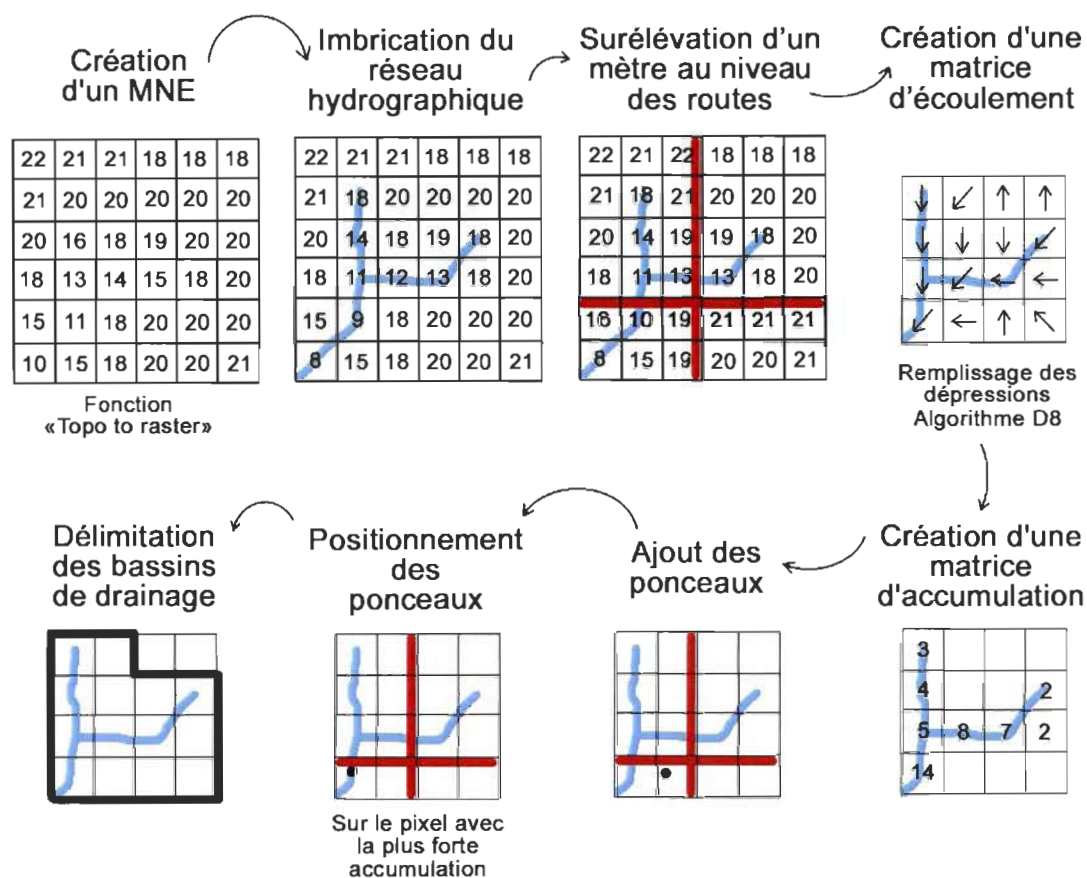


Figure 21 : Méthodologie de délimitation des bassins de drainage

3.3.3 Choix de la méthode d'interpolation

Pour les besoins de notre recherche, plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées afin de déterminer la méthode d'interpolation qui convenait le mieux à la zone d'étude. Les méthodes d'interpolations spatiales de l'Inverse de la Distance Pondérée (IDW), du Krigeage simple, du krigeage ordinaire, du krigeage universel, du Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN) et de la fonction «Topo to raster» ont été comparées à l'aide de la racine de l'erreur moyenne au carré (RMSE) obtenue par un échantillon de points confronté aux estimations ainsi que par les résultats de délimitation des bassins de drainage. Le

choix de ces méthodes d'interpolation a été effectué en fonction des méthodes les plus utilisées dans la littérature, de même qu'en fonction du SIG utilisé lors de la recherche.

Étant donné la qualité des données d'élévation, les MNE ont été générés à une résolution de 5 m. Une telle résolution apporte des fichiers de grande taille difficiles à traiter dans ArcGIS. Afin d'être en mesure d'utiliser toutes les méthodes d'interpolation, la zone à l'étude fut divisée en quatre sections. La comparaison entre les méthodes d'interpolation spatiale ne s'est faite que sur une seule section, celle couvrant le bassin de la rivière des Anglais (en vert, Figure 22). La topographie étant semblable pour tout le territoire, les résultats d'interpolation différaient peu entre les sections.

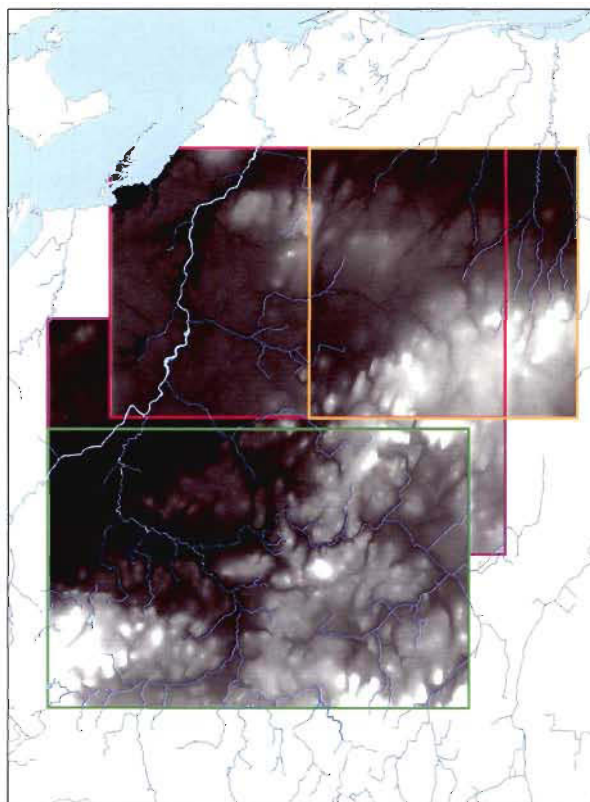


Figure 22 : Division de la zone à l'étude en 4 sections se recoupant pour permettre une délimitation des bassins sensée

La racine de l'erreur moyenne au carré (RMSE) obtenue par un échantillon des points cotés ainsi que des repères géodésiques (55 points d'élévations) sélectionnés aléatoirement (Figure 23) et confrontés aux estimations a été comparée pour tous les MNE à l'aide d'une analyse de variance et de test de T réalisés avec le logiciel SYSTAT

12 (Systat Software Inc). Le RMSE est la mesure de l'erreur la plus largement utilisée (Weng 2002). Il se calcule de la façon suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{mne} - z_t)^2}$$

où Z_{mne} = L'élévation au point i mesurée sur le MNE
 Z_t = L'élévation mesurée sur le terrain
 n = Nombre de points d'élévation validés

Toutefois, la qualité de la matrice d'accumulation était primordiale. Une matrice d'accumulation a donc été réalisée pour chacune des méthodes d'interpolation. L'ordre de Strahler a été établi pour tous les cours d'eau afin de détecter les erreurs dans la matrice.

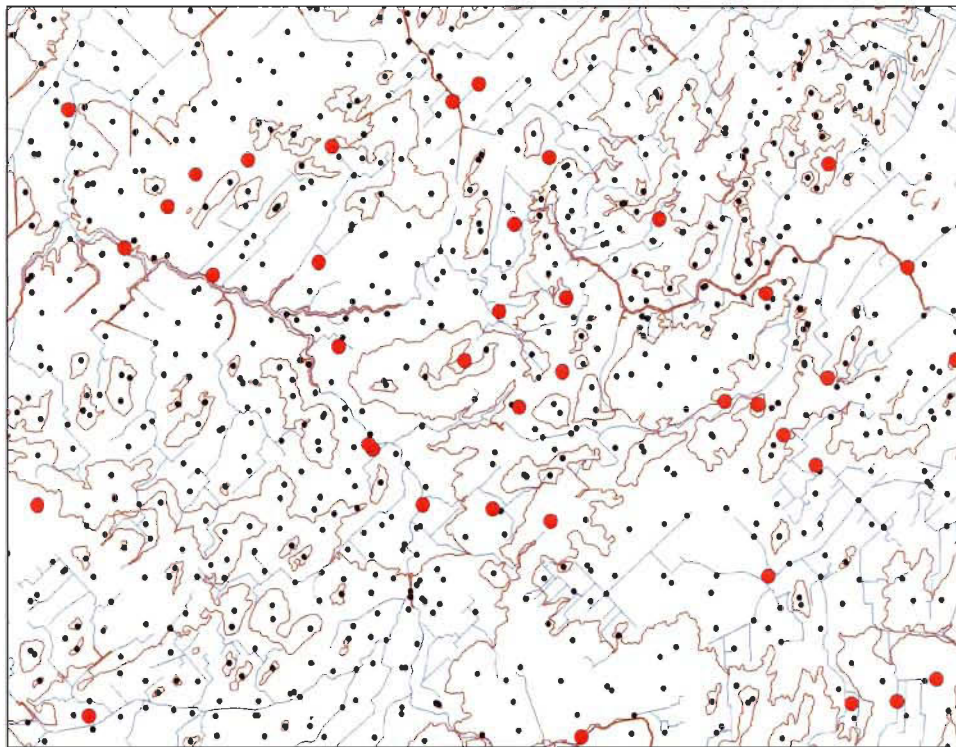


Figure 23: Courbes de niveau (en brun) et points d'élévations (en noir) qui ont servi à la création du MNE de la figure 6. Les échantillons des points cotés ainsi que des repères géodésiques ayant servi à calculer le RMSE sont représentés en rouge. Le réseau hydrographique est visible en bleu

Après plusieurs tests, notre choix s'est porté sur la fonction «Topo to raster». Le RMSE obtenu pour cette méthode était le plus bas en plus d'obtenir des résultats plus réalistes lors de la création des matrices d'écoulement.

3.3.4 Modifications apportées au MNE

Bien que le réseau de drainage ait été pris en compte lors de la création du MNE à l'aide de la fonction «Topo to raster», une imbrication par «Stream burning» a été appliquée au MNE afin d'obtenir une matrice d'écoulement plus réaliste (Turcotte et al. 2000 ; Kenny et Matthews 2005). Les cours d'eau ont été encastrés de six mètres dans le MNE. Par la suite, une zone tampon de dix mètres a été générée à l'aide d'un calcul de distance euclidienne. Un filtre d'une taille de 3 pixels par 3 pixels a permis de lisser le contour des cours d'eau. Toutes les dépressions du MNE ont par la suite été repérées et éliminées à l'aide d'une fonction du logiciel ArcGIS. Cette fonction itérative remplit les dépressions et diminue l'élévation à certains endroits de manière à créer des brèches. La matrice obtenue offre donc un écoulement continu.

La région hydrographique des Basses Terres du Saint-Laurent est une zone de faible topographie où les éléments linéaires tels que les routes modifient grandement le drainage. De manière à tenir compte du réseau routier lors de la délimitation des bassins versants, une surélévation d'un mètre du MNE (Figure 21) a été effectuée au niveau des routes et autoroutes (exception faite pour les rues). Ce MNE modifié a permis de délimiter les bassins de drainage des ponceaux.

3.3.5 Délimitation des bassins de drainage

Après la modification du MNE, l'utilisation de l'algorithme D8 a permis d'obtenir une matrice d'écoulement. Cet algorithme a été choisi, car il est l'un des plus fréquemment utilisés, par conséquent facilement accessible dans le logiciel ArcGIS. La principale faiblesse de cet algorithme est la création d'écoulement parallèle, un défaut qui n'affecte pas l'objectif de la délimitation des bassins de drainage, la représentation parfaite de l'écoulement n'étant pas un de nos objectifs principaux.

La création de la matrice d'écoulement a permis la création d'une matrice d'accumulation. Cette dernière a permis de mieux positionner les ponceaux en les situant sur le pixel localisé à proximité possédant la plus forte accumulation. En effet, les ponceaux sont des éléments linéaires d'une longueur souvent supérieure à 5 mètres, soit plus que la résolution de la matrice d'écoulement. Cette imprécision sur la localisation, associée à l'erreur de localisation du récepteur GPS a fait en sorte que la localisation des points GPS de quelques ponceaux ne coïncidait pas avec le point où l'accumulation était la plus forte. En utilisant une fonction de repositionnement des ponceaux sur le pixel à proximité possédant la plus forte accumulation, une partie de l'erreur de positionnement a pu être éliminée.

Les ponceaux ont été considérés en tant qu'exutoire, et les bassins de drainage ont été délimités pour chacun d'eux. La superficie de chaque bassin de drainage a été calculée de même que la pente moyenne. Cette dernière variable a été obtenue en réalisant une carte de pente en pourcentage pour les MNE du secteur à l'étude. La moyenne des pentes a été calculée pour tous les bassins de drainage.

La superficie des bassins de drainage et la pente étaient deux des trois variables dont l'influence sur le diamètre des ponceaux était à vérifier. La délimitation des bassins de drainage combinée à la classification d'une image satellite a permis d'obtenir l'utilisation du sol pour la zone.

3.4 CLASSIFICATION SUPERVISÉE DE L'IMAGE LANDSAT

3.4.1 Logiciel et données utilisés

La classification des valeurs spectrales des images satellites est probablement l'utilisation la plus importante de la télédétection (Gomez et Montero 2008). Le logiciel Geomatica (PCI Geomatics) a servi à la classification d'une image du capteur Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de Landsat-7 prise le 8 juin 2001. Plusieurs recherches utilisent les images Landsat pour la classification de l'utilisation du sol (Boentje et Blinnikov 2007 ; Hu et Lo 2007 ; Park et Stenstrom 2007 ; Sun et al. 2007). Cette image a été choisie, car sa résolution de 30 mètres semblait appropriée pour l'identification de l'utilisation du sol, en plus d'être facilement et gratuitement disponible en version

orthorectifiée sur le site Internet GéoBase (Conseil canadien de la géomatique 2008). Elle contient 6 bandes spectrales à 30 mètres de résolution (Tableau 1). Une image panchromatique de 15 mètres de résolution et deux bandes spectrales dans l'infrarouge thermique d'une résolution de 60 mètres au sol sont aussi disponibles, mais n'ont pas servi lors de la classification.

Tableau 1 : Bandes spectrales de l'image satellite du capteur ETM+ de Landsat 7 ayant une résolution de 30 mètres au sol

Nom de la bande spectrale	Onde captée	Longueurs d'onde captées (μm)
ETM 1	Bleu-Vert	0,450 à 0,515
ETM 2	Vert	0,525 à 0,605
ETM 3	Rouge	0,630 à 0,690
ETM 4	Infrarouge	0,750 à 0,900
ETM 5	Infrarouge Moyen 1	1,550 à 1,750
ETM 7	Infrarouge Moyen 2	2,090 à 2,350

Afin d'éviter que la topographie influence les valeurs enregistrées au capteur, des rapports de bandes ont été réalisés. Un seuillage d'histogramme a aussi permis d'étaler les valeurs pour une meilleure discrétisation. Le tableau 2 contient les bandes qui ont servi à la classification. On peut noter qu'un indice de différence normalisé de la végétation (NDVI) a été utilisé. Le rapport de bande utilisé pour le NDVI est le suivant :

$$NDVI = \frac{PIR - RED}{PIR + RED}$$

où PIR = Proche Infrarouge ou bande 4
 RED = Rouge ou bande 3

Cet indice est très utilisé et il a été reconnu comme un outil efficace pour la quantification des biomasses de végétation (Goward et al. 1985), de la production primaire (Boelman et al. 2003) et des changements d'utilisation du sol (Tucker 1979).

Tableau 2: Paramètres utilisés lors de la classification des valeurs spectrales de l'image satellite

Bandes et rapport de bandes de la classification
Bleu-Vert
Vert
Vert/ Bleu-Vert
Infrarouge/ Bleu-Vert
Infrarouge Moyen 1/ Rouge
Infrarouge Moyen 2/ Bleu-Vert
Infrarouge Moyen 2/ Infrarouge
Infrarouge Moyen 2/ Infrarouge Moyen 1
NDVI

3.4.2 Choix de la méthode de classification

La classification de l'image satellite a été effectuée de façon supervisée. L'algorithme par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood) a été choisi afin d'effectuer la classification. Les couverts identifiés lors de la classification sont : contour de l'image, eau, terres humides, zone urbaine de haute densité (zone urbaine HD), zone urbaine de faible densité (zone urbaine FD), forêt, faible végétation et zone agricole. Une fois la classification du sol terminée, les pourcentages d'utilisation du sol pour chaque bassin de drainage ont été identifiés.

3.5 RELATION ENTRE LE DIAMÈTRE DES PONCEAUX ET LA SUPERFICIE DES BASSINS DE DRAINAGE

La relation entre le diamètre des ponceaux, la superficie des bassins de drainage, l'utilisation du sol et la pente a été vérifiée par régression multiple à l'aide du logiciel SYSTAT 12 (Systat Software Inc). La longueur du cours d'eau, une caractéristique importante influençant le débit, n'a pas été prise en compte, car les cours d'eau qui alimentent les ponceaux sont souvent saisonniers et difficiles à répertorier. Suite à l'obtention de la régression, un intervalle de confiance a été calculé de même qu'un intervalle de prévision. L'intervalle de prévision a permis d'identifier les ponceaux dont le diamètre n'est pas proportionnel à la superficie de leurs bassins de drainage.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

4.1 Recensement des ponceaux

Le recensement des ponceaux des routes régionales et collectrices de la zone à l'étude nous a permis d'obtenir un échantillon de 103 ponceaux. Leurs diamètres varient de 30 à 300 cm, avec une moyenne de 91 cm, une médiane de 60 cm et un écart-type de 52,7 cm (Figure 24). La distribution des ponceaux en fonction de leur route d'origine se retrouve dans le tableau 3. Les ponceaux ont servi d'exutoire lors de la délimitation des bassins de drainage. La délimitation a été effectuée avec l'utilisation de MNE créés à l'aide de méthode d'interpolation spatiale.

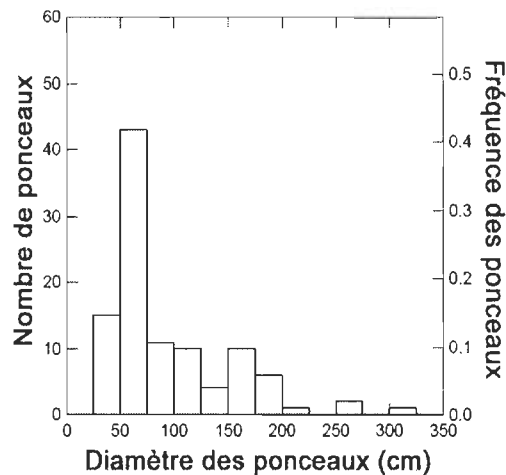


Figure 24 : Fréquence du diamètre des ponceaux

Tableau 3: Distribution du nombre de ponceaux en fonction des routes

	203	205	209	Route du nord	Total
Nombre de ponceaux	51	10	33	9	103
Pourcentage (%)	49,52	9,71	32,04	8,74	100

4.2 Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation spatiale

Afin de comparer les méthodes d'interpolation de l'Inverse de la Distance Pondérée (IDW), du Krigage, du Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN) et de Topo to raster, un

échantillon de points a été sélectionné afin de calculer le RMSE. Les résultats de chacune des méthodes sont disponibles au tableau 4.

Tableau 4 : Résultat de la racine de l'erreur moyenne au carré pour les différentes méthodes d'interpolation spatiale de la recherche

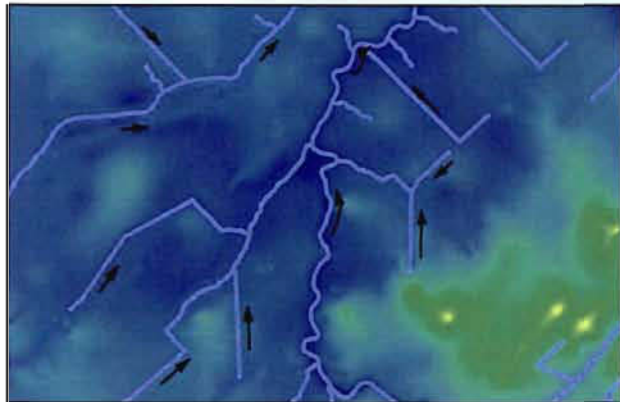
<i>Méthode</i>	<i>RMSE (m)</i>
Topo to raster	2.068
TIN	2.521
Krigeage Simple	2.542
Krigeage Ordinaire	2.936
IDW	2.937
Krigeage Universel	3.038

La méthode d'interpolation «Topo to raster» a généré le RMSE le plus faible (2,068m). Bien que l'analyse de variance ait démontré que les RMSE étaient significativement différents ($p \geq 0,05$), la différence de RMSE entre la fonction «Topo to raster» et les deux autres ayant le mieux performé (TIN et Krigeage simple) n'est pas significative ($p \geq 0,05$). Afin de sélectionner la méthode la plus performante, la qualité de la matrice d'accumulation a aussi été comparée pour chacune des méthodes d'interpolation. L'ordre de Strahler a été établi pour tous les cours d'eau afin de détecter les erreurs dans la matrice (encadrées en rouge, carte 3). La fonction «Topo to raster», a été la seule méthode en mesure de représenter correctement l'écoulement des cours d'eau. Elle a donc été choisie pour la délimitation des bassins de drainage.

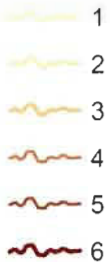
4.3 Délimitation des bassins de drainage des ponceaux

Afin de tenir compte de l'effet du réseau routier sur la topographie, une augmentation d'altitude d'un mètre a été effectuée au niveau des routes. Les bassins de drainage des ponceaux obtenus suite à cette augmentation ont été comparés à ceux obtenus d'un MNE sans augmentation de l'altitude au niveau des routes (Carte 4). En règle générale, la délimitation obtenue avec l'augmentation d'un mètre est beaucoup plus réaliste. Les bassins ont donc été générés avec cette technique. Leurs tailles varient de 132 m² à 5,14 km² (Figure 25a). La moyenne de la superficie était de 0,58 km², avec une médiane de

Carte 3: Matrices d'accumulation des différentes méthodes d'interpolation spatiale



Ordre de Strahler

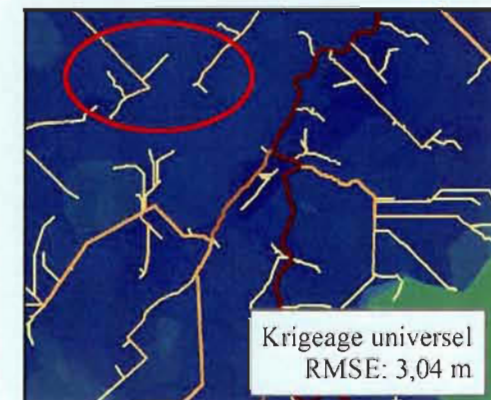
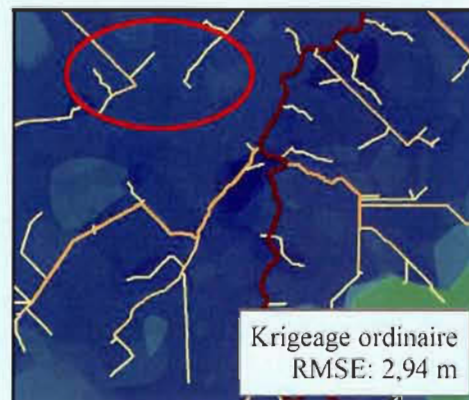
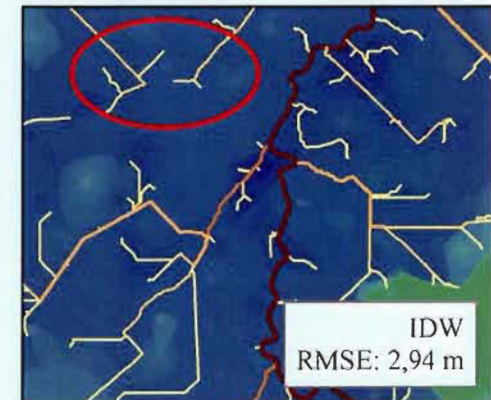
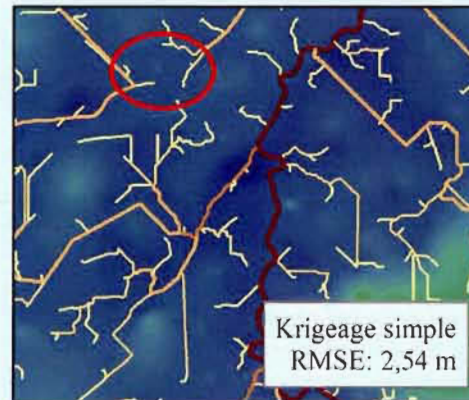
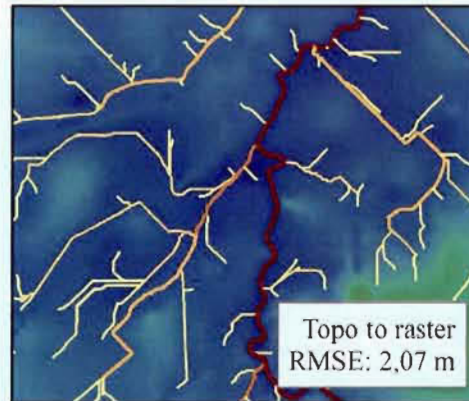
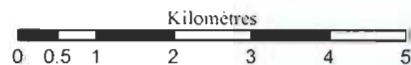


Université du Québec
à Trois-Rivières



Conception:
M-E Gauthier
Source:
BNDT, BDTQ, MTQ



RMSE: Root Mean Square Error
Racine de l'erreur moyenne au carré








Carte 4: Bassins de drainage des ponceaux



Bassins de drainage des ponceaux

-  Délimitation avec un MNE dont les routes sont incrémentées d'un mètre
-  Délimitation avec un MNE de base

Réseau routier

-  Ponceau à l'étude
-  Chemin de fer
-  Route nationale
-  Route régionale et collectrice
-  Route locale



Conception:
M-E Gauthier
Source:
BNDT, BDTQ, MTQ



0,04 km² pour un écart-type de 1,19 km². La pente de ces bassins restait très faible en général (Figure 26). En effet, la pente moyenne (Figure 25b) varie de 0,38% à 9,68%, avec une moyenne de 2,32%, une médiane de 1,55% et un écart-type de 2,08%.

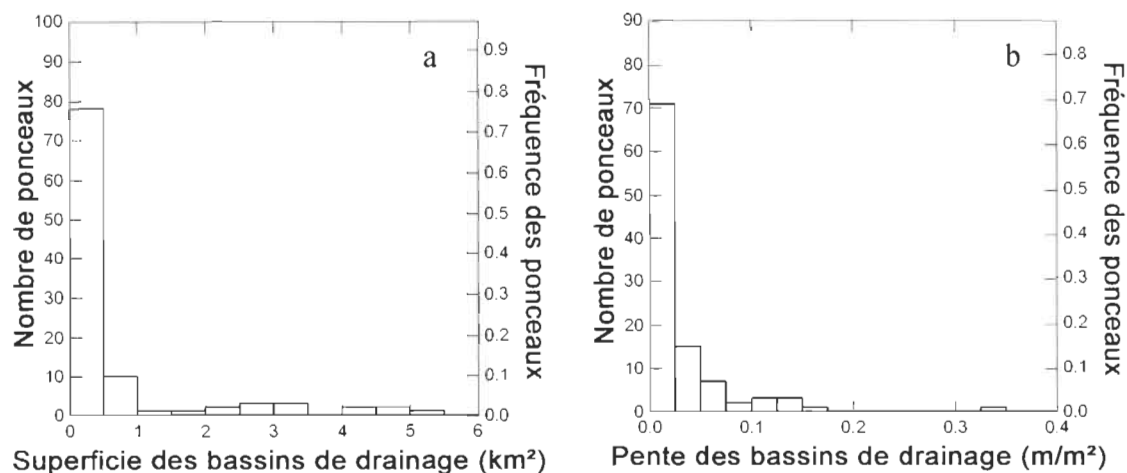


Figure 25 : Distribution de a) la superficie des bassins de drainage et de b) la pente des bassins de drainage

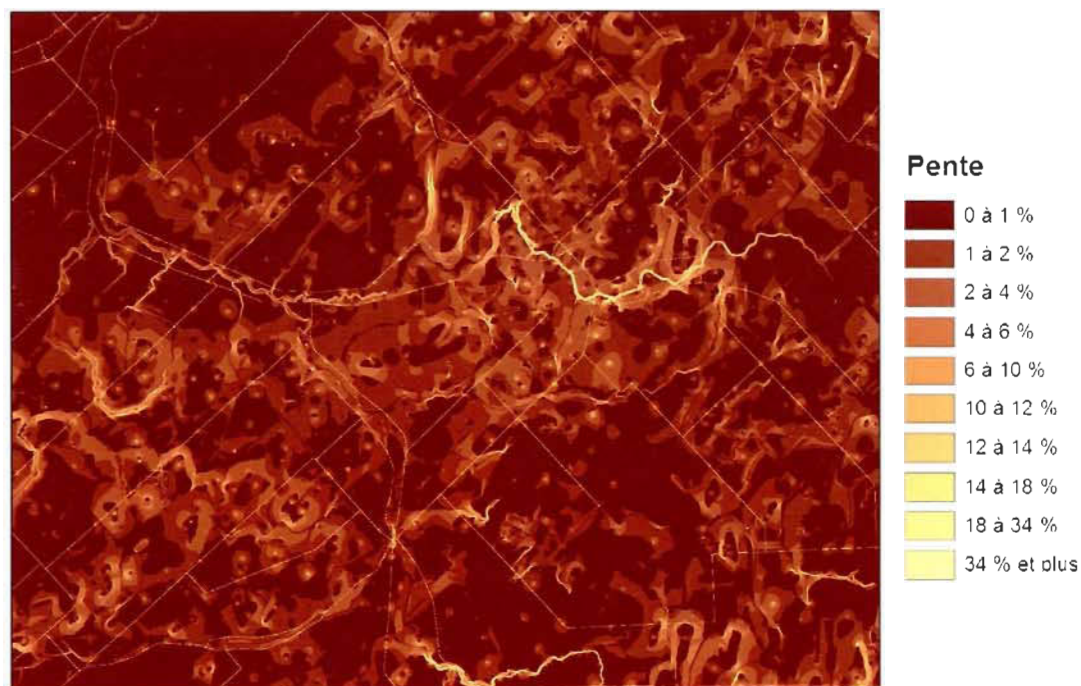


Figure 26 : Carte des pentes pour la section de la rivière des Anglais

4.4 Classification supervisée de l'image LANDSAT

La carte 5 présente le résultat de la classification supervisée de l'image satellite LANDSAT. Celle-ci a une efficacité moyenne de 96,37 % pour les sites test. Le tableau 5 présente la matrice de confusion pour les différentes classes. Les classes se séparant parfaitement (100%) sont Eau et Forêt. Il a été plus difficile de bien différencier les classes Urbain haute densité (91,3%) et Urbain faible densité (90,8%).

Tableau 5 : Matrice de confusion des sites d'entraînement de la classification supervisée de l'image LANDSAT

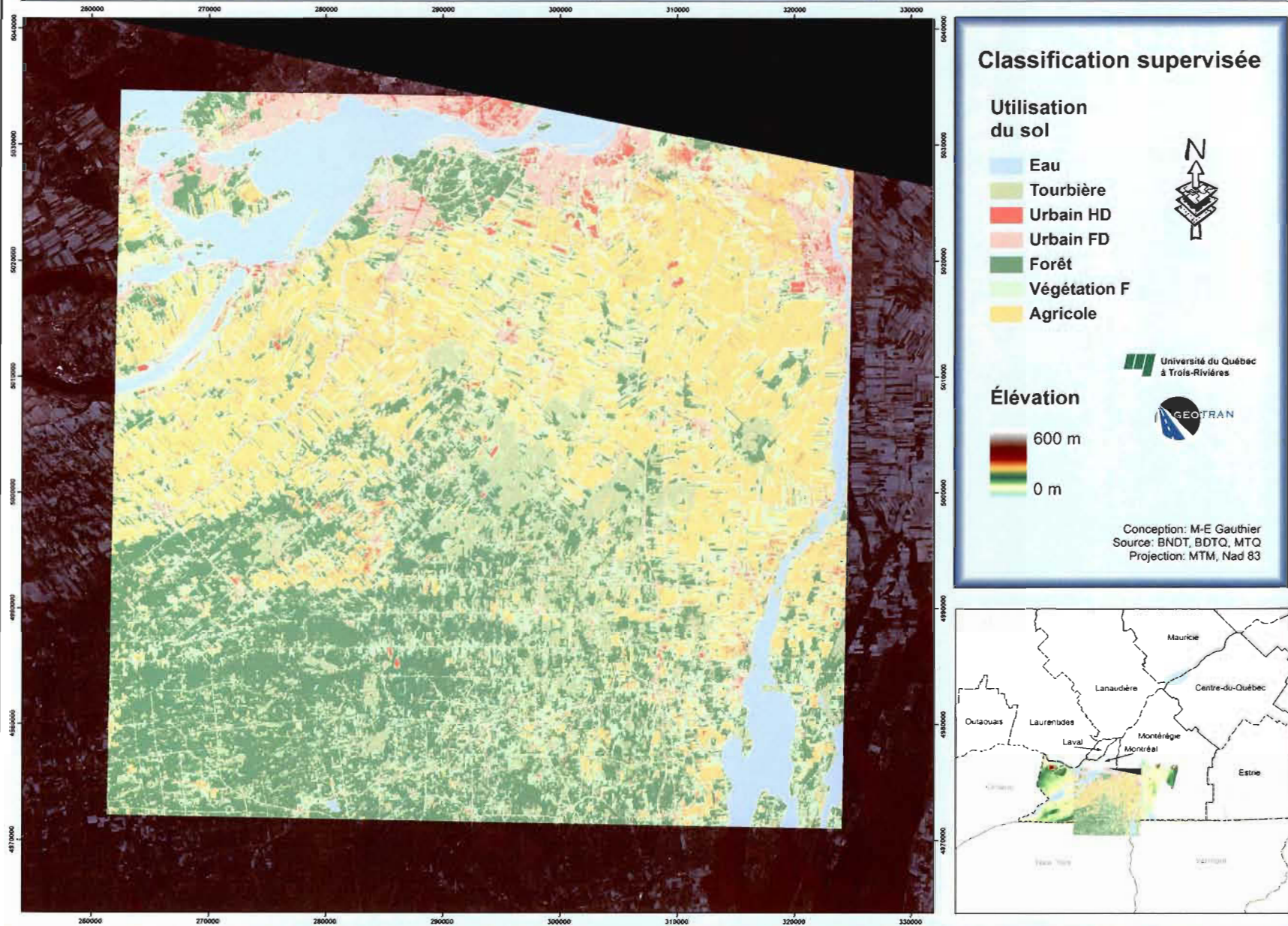
Classe	# de pixel	Contour	Eau	Tourbière	Urbain HD	Urbain FD	Forêt	Végétation F	Agricole
Eau	463	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tourbière	1085	0%	0%	98%	0%	0,2%	0,6%	1,3%	0%
Urbain HD	243	0%	0%	0%	91,3%	3,3%	0%	0,4%	4,9%
Urbain FD	509	0%	0%	0%	4,1%	90,8%	0,2%	4,9%	0%
Forêt	82	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
Végétation F	365	0%	0%	0%	0%	2,7%	0%	96,2%	1,1%
Agricole	3323	0%	0%	0%	4,8%	0,2%	0%	0,4%	94,7%

Le pourcentage d'utilisation du sol pour chaque bassin de drainage a été calculé. Le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane et l'écart type de chaque utilisation du sol sont disponibles dans le tableau 6. Ces données, ainsi que la superficie des bassins de drainage et leur pente ont été utilisées lors d'une régression multiple.

Tableau 6 : Statistiques descriptives du pourcentage d'utilisation du sol des bassins de drainage des ponceaux

Statistiques	Eau	Tourbière	Urbain HD	Urbain FD	Forêt	Végétation F	Agricole
Minimum	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Maximum	0,7%	71,43%	100%	100%	61,57%	100%	100%
Moyenne	0,009%	2,93%	8,22%	15,17%	13,49%	33,88%	27,3%
Médiane	0%	0%	1,15%	2,5%	1,7%	30,16%	13,48%
Écart-type	0,07%	9,33%	18,62%	28,86%	17,83%	28,66%	17,83%

Carte 5: Classification supervisée d'une image LANDSAT



4.5 Vérification de l'influence de différents critères sur le diamètre des ponceaux

Une régression multiple avec pour variable dépendante le diamètre des ponceaux a été effectuée. La superficie des bassins de drainage, leurs pentes, le pourcentage couvert de lacs et de zones humides, le pourcentage végétalisé, le pourcentage en zone urbaine et le pourcentage en milieu agricole ont été considérés comme variable indépendante. Toutefois, seule la superficie des bassins de drainage a été retenue en tant que variable significative ($p \geq 0,05$). On obtient ainsi un coefficient de détermination (R^2) de 0,665. La figure 27 présente la relation entre le diamètre des ponceaux et la superficie des bassins de drainage. L'intervalle de prévision a été choisi pour l'identification des ponceaux très vulnérables. En effet, la borne inférieure correspond à la limite en dessous de laquelle les ponceaux sont très sous dimensionnés ($p \geq 0,05$).

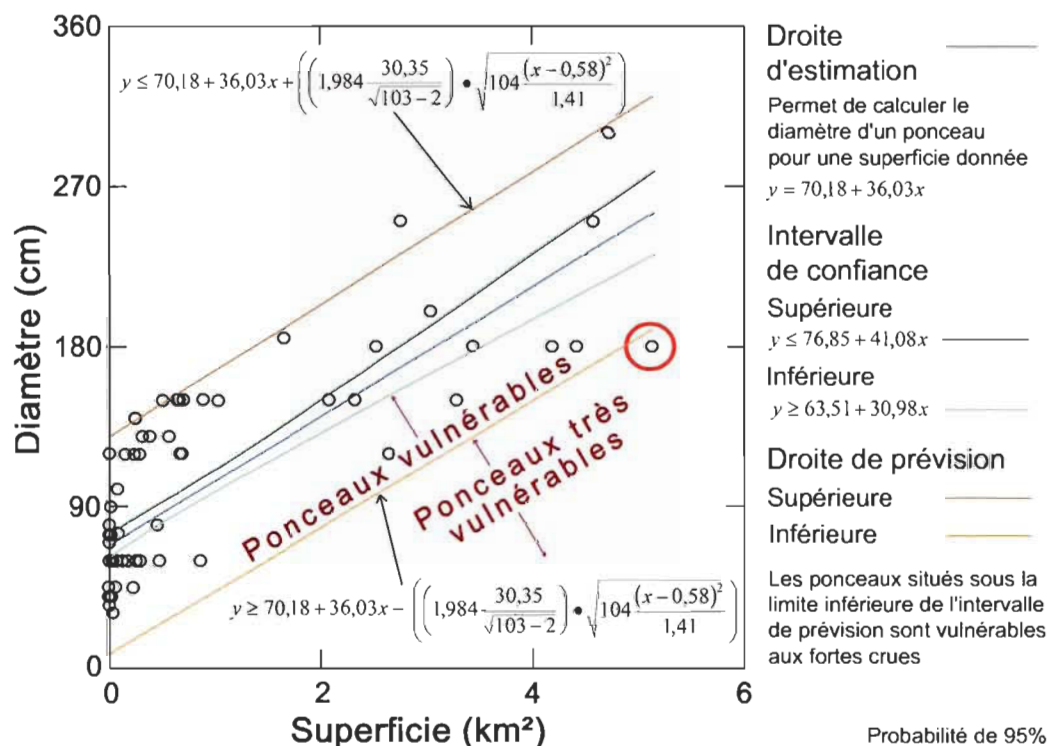


Figure 27 : Intervalle de confiance et de prédiction pour la relation entre la superficie et le diamètre des ponceaux.

Seul un des ponceaux de l'échantillon était situé en dessous de cette limite (entouré d'un cercle rouge, figure 27). Toutefois, les ponceaux localisés en dessous de l'intervalle de confiance inférieur et au-dessus de l'intervalle de prévision inférieur sont tout de même vulnérables, considérant le fait qu'ils sont en dehors de l'intervalle de confiance. Deux seuils de vulnérabilité ont donc été identifiés : très vulnérable et vulnérable aux épisodes de fortes crues.

CHAPITRE V

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de proposer une méthode permettant d'identifier les ponts les plus vulnérables aux fortes crues en fonction de leur capacité de drainage, étant donné que cela est actuellement difficilement réalisable avec la méthode de dimensionnement du MTQ. Un des objectifs découlant de ce but était de générer un MNE de haute précision adapté à un terrain de faible topographie. Les MNE réalisés à l'aide de «Topo to raster» sont bien adaptés au terrain de faible topographie de la zone à l'étude étant donné l'utilisation du réseau hydrographique et du réseau routier. L'imbrication d'un réseau hydrographique orienté donne les meilleurs résultats, tout comme dans les travaux de Kenny et Matthews (2005). La valeur du RMSE est de 2,07 m, ce qui est inférieur à l'erreur inhérente aux courbes de niveau. L'apport du réseau routier au MNE a permis d'obtenir une délimitation des bassins de drainage plus réaliste, des résultats qui se comparent à ceux obtenus par Duke et al. (2003, 2005). Cela correspond au deuxième objectif secondaire, soit proposer une méthode rapide et simple de délimitation des bassins de drainage des ponts qui tient compte des modifications topographiques et hydrologiques apportées par le réseau routier.

Quelques bassins de drainage ne semblent pas correspondre parfaitement à la réalité (Figure 28). En effet, la présence de champs, donc de fossés de drainage, modifie la topographie (Duke et al. 2005). Tenir compte de ces modifications topographiques nécessite beaucoup de données, ce qui augmente la complexité de la délimitation des bassins de drainage. L'augmentation de la précision des données de base du MNE avec une technique comme le LIDAR serait une avenue plus réaliste permettant d'obtenir une meilleure précision pour la délimitation des bassins (Murphy et al. 2008).

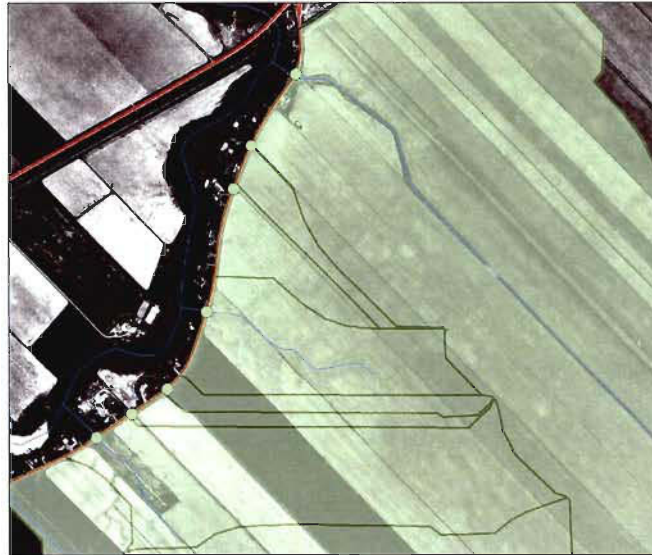


Figure 28 : Délimitation des bassins de drainage qui ne semble pas appropriée étant donné la présence de champ

Identifier les variables essentielles à l'établissement d'une relation entre la superficie des bassins de drainage des ponceaux et le diamètre de ces derniers était un des objectifs clés de l'étude. Toutefois, seule la superficie des bassins de drainage a été identifiée par la régression linéaire. Le rejet de la variable «pente» peut cependant s'expliquer par son manque de variabilité spatiale dans le secteur à l'étude. En effet, celui-ci est situé en terrain de faible topographie, et la pente moyenne la plus forte n'était que de 9,68%. Il est probable qu'une plus grande variabilité aurait permis de mettre en évidence l'influence de la pente.

Pour identifier les ponceaux vulnérables aux inondations, il est nécessaire d'établir une relation entre la superficie des bassins de drainage des ponceaux et le diamètre de ceux-ci. Les résultats suggèrent que la superficie des bassins de drainage explique à 67% le diamètre des ponceaux. Cette relation entre la superficie et le diamètre des ponceaux est plus faible que les relations entre la superficie et le débit décrites dans d'autres recherches (Assani et al. 2006; Assani et al. 2005; Belzile et al. 1997; Rousselle et al. 1990; Hoang et Tremblay 1976; Anctil et al. 1998). Toutefois, l'échantillon comprend des ponceaux d'années de constructions différentes et rien n'indiquait qu'ils aient fait l'objet de calculs de dimensionnement. Un échantillon de ponceaux récents permettrait probablement d'obtenir un coefficient de corrélation plus élevé.

Cette recherche propose d'utiliser la position des ponceaux par rapport au seuil de prévision inférieur et à l'intervalle de confiance inférieur de la figure 27 comme critère de vulnérabilité des ponceaux aux fortes crues. Deux seuils de vulnérabilité ont été établis. Tous les ponceaux se situant en dessous de l'intervalle de prévision inférieur calculé au seuil de probabilité de 95% sont considérés comme très vulnérables, donc fortement sous dimensionnés. Les ponceaux localisés entre l'intervalle de confiance inférieur et l'intervalle de prévision inférieur sont considérés comme vulnérables, car ils ne suivent pas la droite de prévision du diamètre des ponceaux en fonction de leur superficie. Plus la position du ponceau dans le graphique s'éloigne de la droite de prévision, plus celui-ci risque d'être vulnérable.

Il est à noter que le ponceau de l'étude situé au-delà du seuil de prévision inférieur (entouré d'un cercle rouge sur la figure 27) a un diamètre de 180 cm et est localisé sur la route 209 dans la municipalité de Saint-Rémi. L'état de ce ponceau est très mauvais. Certains faits pourraient expliquer ce mauvais état. Il peut s'agir d'une détérioration naturelle due aux assauts du temps, comme d'une détérioration accélérée due à une absence de calcul de dimensionnement.

Lors de cette recherche, seules les routes régionales et collectrices ont été échantillonnées de manière à comparer des ponceaux de même débit de récurrence. Il serait important de répéter l'expérience sur les autoroutes et les routes nationales afin d'obtenir les droites de régression nécessaires à l'identification des ponceaux vulnérables sur ces routes. De plus, l'utilisation de plus en plus fréquente de ponceaux rectangulaires complique la tâche car il est plus difficile d'évaluer la capacité de ces ponceaux. Bien que certains travaux aient été effectués au MTQ de la DT de l'Ouest de la Montérégie pour convertir les ponceaux rectangulaires en ponceaux circulaires[†], les analyses n'ont pas permis d'obtenir des résultats concluants.

La relation entre la superficie et le diamètre identifié ne peut correspondre qu'à un terrain de faible topographie. Un échantillonnage sur des zones de plus fortes

[†] Correspondance entre M. Lévi Sokou, Chargé d'études du Service de l'inventaire et du plan de la section Géotechnique/Hydraulique de la Direction Territoriale de l'Ouest de la Montérégie

topographies serait essentiel à la vérification de l'effet de la pente et de l'utilisation du sol sur le diamètre des ponceaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Anctil, F., Martel, N., et Hoang, V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **25**(3): 360-369.
- Assani, A. A., Stichelbout, É., Roy, A. G., et Petit, F. 2006. Comparison of impacts on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Quebec (Canada). *Hydrologic Processes*, **20**: 3485-3501.
- Assani, A. A., Gravel, E., Buffin-Bélanger, T., et Roy, A. G. 2005. Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec. *Revue des sciences de l'eau*, **18**(1): 103-127.
- Beckers, J., Alila, Y., et Mtiraoui, A. 2002. On the validity of the British Columbia Forest Practices Code guidelines for stream culvert discharge design. *Canadian Journal of Forest Research*, **32**(4): 684-692.
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D., et Leclerk, M. 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc., Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec et Pêches et Océans Canada, Rapport R494.
- Boelman, N. T., Stieglitz, M., Rueth, H. M., Sommerkorn, M., Griffin, K. L., Shaver, G. R., et Gamon, J. A. 2003. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia*, **135**: 414-421.
- Boentje, J. P., et Blinnikov, M. S. 2007. Post-Soviet forest fragmentation and loss in the Green Belt around Moscow, Russia (1991-2001): a remote sensing perspective. *Landscape and Urban Planning*, **82**: 208-221.
- Boutet C. et National Post. 2007. 'It's just havoc': Post-tropical storm Chantal batters Newfoundland [En ligne]. Disponible à <http://network.nationalpost.com/np/blogs/posted/archive/2007/08/01/it-s-just-havoc-post-tropical-storm-chantal-batters-newfoundland.aspx> [Cité le 5 juin 2008].
- Chang, C. -L., Lo, S. -L., et Yu, S. -L. 2006. Role of Geographic Information System (GIS) in watershed simulation by winvast model. *Environmental Monitoring and Assessment*, **121**: 289-301.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguëdois, S., Silvera, N., et Phachomphon, K. 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, **77**: 126-141.

- Charlton, R., Fealy, R., Moore, S., Sweeney, J., et Murphy, C. 2006. Assessing the Impact of Climate Change on Water Supply and Flood Hazard in Ireland Using Statistical Downscaling and Hydrological Modelling Techniques. *Climatic Change*, **74**(4): 475-491.
- Chirico, G. B., Western, A. W., Grayson, R. B., et Blöschl, G. 2005. On the definition of the flow width for calculating specific catchment area patterns from gridded elevation data. *Hydrological Processes*, **19**(13): 2539-2556.
- Conseil canadien de la géomatique. 2008. GéoBase [En ligne]. Disponible à <http://www.geobase.ca/> [Cité le 21 février 2008].
- Desmet, P. J. J. 1996. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**: 563-580.
- Duke, G. D. 2004. A GIS expert system for the delineation of watersheds in low-relief regions with rural infrastructure. Thèse en Sciences de l'Environnement, University of Lethbridge, Alberta.
- Duke, G. D., Stefan, W. K., Johnson, D. L., et Byrne, J. M. 2003. Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into Digital Elevation Models. *Journal of Spatial Hydrology*, **3**(2): 1-27.
- Duke, G. D., Stefan, W. K., Johnson, D. L., et Byrne, J. M. 2005. Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths. *Hydrological Processes*, **20**(8): 1827-1843.
- Endreny, T. A., Wood, E. F., et Lettenmaier, D. P. 2000. Satellite-derived digital elevation model accuracy: hydrogeomorphological analysis requirements. *Hydrological Process*, **14**: 1-20.
- Environmental System Research Institute (ESRI). 2003. The principles of geostatistical analysis. *Dans*: ArcGIS 9, Using ArcGIS Geostatistical Analyst. *Éditeur* : ESRI, Etats-Unis. pp. 49-79.
- Erdogan, E. H., Erpul, G., et Bayramin, İ. 2007. Use of USLE/GIS Methodology for Predicting Soil Loss in a Semiarid Agricultural Watershed. *Environ Monit Assess*, **131**: 153-161.
- Ersine, R. H., Green, T. R., Ramirez, J. A., et MacDonald, L. H. 2006. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research*, **42**(9): W09416.
- Gazette officielle du Québec. 1996. Normes d'intervention dans les forêts du domaine public. *Gazette officielle du Québec*, Québec, Volume 19, pp. 2772-2786, rapport 498-96.

- Gomez, D., et Montero, J. 2008. Fuzzy sets in remote sensing classification. *Soft computing*, **12**(3): 243-249.
- Goward, S. N., Tucker, C. J., et Dye, D. G. 1985. North-American Vegetation Patterns observed with the NOAA-7 advanced very high-resolution radiometer. *Vegetatio*, **64**(1): 3-14.
- Hoang, V. D., et Tremblay, R. 1976. Estimation des débits d'étiage d'été des rivières du Québec Méridional. Service de l'hydrométrie, Ministère des Richesses Naturelles, Québec, Publications officielles.
- Hotchkiss, R. H., et McCallum, B. E. 1995. Peak Discharge for Small Agricultural Watersheds. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(1): 36-48.
- Hotte, M., et Quirion, M. 2003. Guide technique no. 15, Traverses de cours d'eau. Fondation de la faune du Québec et Fédération des producteurs de bois du Québec, Sainte-Foy, Publications du gouvernement du Québec.
- Hu, Z., et Lo, C. P. 2007. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, **31**: 667-688.
- Hutchinson, M. F., et Dowling, T. I. 1991. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes*, **5**(1): 45-58.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Les projection pour l'évolution future du climat de la terre. *Dans* : Bilan 2001 des changements climatiques. *Éditeurs*: Cambridge University Press, États-Unis. pp. 58-72.
- Jakob, M., et Jordan, P. 2001. Design flood estimates in mountain streams - The need for a geomorphic approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **28**(3): 425-439.
- Johnson, P. A., et Brown, E. R. 2000. Stream Assessment For Multicell Culvert Use. *Journal of Hydraulic Engineering*, **126**(5): 381-386.
- Kenny, F., et Matthews, B. 2005. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences*, **31**(6): 768-779.
- Martz, L. W., et Garbrecht, J. 1998. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological Processes*, **12**(6): 843-855.
- Ministère des Transports. 1994. Manuel de conception des ponceaux. Service de l'hydraulique, Québec, Publications officielles.

- Molloy, R., et Torresan, R. 2001. Saines pratiques, Voirie forestière et installation de ponceaux. Ministère des ressources naturelles, Québec, Rapport 2001-3074.
- Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Meng, F-R., et Arp, P. 2008. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrologic Processes*, **22**: 1747–1754.
- Office Québécois de la langue française. 2008. Le grand dictionnaire terminologique [En ligne]. Disponible à <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html> [Cité le 10 janvier 2008].
- Park, M. –H., et Stenstrom, M. K. 2008. Classifying environmentally significant urban land uses with satellite imagery. *Journal of Environmental Management*, **86**: 181–192.
- Potvin, G. 1997. L'aménagement des ponts et des ponceaux dans le milieu forestier. Ministère des ressources naturelles, Charlesbourg (Québec), Rapport RN97-3061.
- Ressources Naturelles Canada. 2008. GéoGratis [En ligne]. Disponible à <http://geogratias.cgdi.gc.ca/> [Cité le 22 février 2008].
- Ressources Naturelles Canada. 2008. Géopanorama du Canada [En ligne]. Disponible à http://geoscape.nrcan.gc.ca/h2o/bowen/acquire_f.php?p=1 [Cité le 10 janvier 2008].
- Rousselle, J., Watt, E. W., Lathem, K. W., Neill, C. R., et Richards, T. L. 1990. Considérations générales sur la crue de projet et Caractéristiques des crues de diverses régions. *Dans : Hydrologie des crues au Canada. Éditeur : Conseil national de recherches Canada, Ottawa (Ont.).* pp. 3-36. J'aurai deux enfants.
- Roy, L., Leconte, R., Brissette, F. P., et Marche, C. 2001. The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. *Hydrological Processes*, **15**(16): 3167-3179.
- Sun, H., Forsythe, W., et Waters, N. 2007. Modeling Urban Land Use Change and Urban Sprawl: Calgary, Alberta, Canada. *Networks and Spatial Economics*, **7**: 353–376.
- Tarboton, D. G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, **33**(2): 309–319.
- Transports Québec. 1995. Ouvrages d'art : normes ouvrages routiers. Ministère des transports, Sainte-Foy, rapport 2551159113.

- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**: 127–150.
- Tung, Y. -K., et Bao, Y. 1990. On the optimal risk based design of highway drainage structures. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **4**(4): 295-308.
- Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A. N., Massicotte, S., et Villeneuve, J.-P. 2000. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, **240**(2-3): 225-242.
- Unesco, et World Meteorological organization. 2007. Glossaire international d'hydrologie [En ligne]. Disponible à <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm> [Cité le 10 janvier 2007].
- Weber, D. D., et Englund, E. J. 1994. Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators II. *Mathematical Geology*, **26**(5): 589-603.
- Weng, Q. 2002. Quantifying uncertainty of digital elevation models derived from topographic maps. *Dans: Advances in Spatial Data Handling. Éditeurs: Richardson, D., et Van Oosterom, P., Springer-Verlag, New York*, pp.403-418.
- Wise, S. 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, **14**(11-12): 1909-1929.
- Zhang, W., Fu, C., et Yan, X. 2005. Automatic watershed delineation for a complicated terrain in the Heihe River basin, Northwestern China. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **4**: 2347-2350.